



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Académica Profesional de Física

**Reducción de escala dinámica del modelo global HadGEM2-
ES con el modelo atmosférico WRF para la generación de
escenarios climáticos regionales para el Perú**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Alan Gerardo LLACZA RODRÍGUEZ

ASESOR

Mg. Octavio FASHÉ RAYMUNDO

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Llacza, A. (2021). *Reducción de escala dinámica del modelo global HadGEM2- ES con el modelo atmosférico WRF para la generación de escenarios climáticos regionales para el Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Alan Gerardo Llacza Rodríguez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41660840
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-4707-8636
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Octavio Fashé Raymundo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10351868
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6743-7800
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Juan Neil Mendoza Nolorbe
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25760992
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Carlos Eche Llenque
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10710458
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Arnulfo Alipio Guillen Guevara
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08413331
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.4.2. Oceanografía Física y Física de la Atmósfera
Grupo de investigación	No aplica.

Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	<p>Edificio: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú</p> <p>País: Perú</p> <p>Departamento: Lima</p> <p>Provincia: Lima</p> <p>Distrito: Jesús María</p> <p>Latitud: -12.079199</p> <p>Longitud: -77.042864</p>
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020 - 2021
URL de disciplinas OCDE	<p>Investigación climática https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.00</p> <p>Meteorología y ciencias atmosféricas https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.00</p>



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 16:00 horas del martes 05 de octubre del 2021, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe, el Lic. José Carlos Eche Llenque (Miembro), Mg. Octavio Fashé Raymundo (asesor), y el Mg. Arnulfo Alipio Guillen Guevara (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física, mediante la Modalidad M1- Por Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional, del Bachiller:

Alan Gerardo Llacza Rodríguez

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como el Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis:

“Reducción escala dinámica del modelo global HadGEM2-ES con el modelo atmosférico WRF para la generación de escenarios climáticos regionales para el Perú”

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

18	dieciocho	Aprobado con mención honrosa
.....
(NÚMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado, remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Física quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional de Licenciado en Física al Bachiller Alan Gerardo Llacza Rodríguez.



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

Siendo las 17:45 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 05 de octubre de 2021.

Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe
PRESIDENTE

Lic. José Carlos Eche Llenque
MIEMBRO

Mg. Octavio Fashé Raymundo
ASESOR

Mg. Arnulfo Alipio Guillen Guevara
SUPLENTE



Firmado digitalmente por ROJAS
ACUNA Joel FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 22.12.2021 15:24:52 -05:00

Dr. Joel Rojas Acuña
VICEDECANO ACADÉMICO - FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

Enlace:

Unirse a la reunión Zoom

<https://us06web.zoom.us/j/88971585184?pwd=RDNVeDhld0tLNnhicGhITUR1ZGJ0Zz09>

ID de reunión: 889 7158 5184

Código de acceso: 400924

Grabación archivada en: <https://fb.watch/9XrV2WIWhg/>

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida y mi familia.

Agradezco también a mi familia por su apoyo incondicional, así como a todo el equipo de profesionales de la Subdirección de Modelamiento Numérico de la Atmósfera del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Finalmente agradezco por el apoyo y asesoramiento para el desarrollo de la presente tesis al Mg. Octavio Fashé Raymundo y al Lic. Miguel Fidencio Saavedra Juan de Dios.

Referencia bibliográfica

Llacza, A. (2021). *Reducción de escala dinámica del modelo global HadGEM2-ES con el modelo atmosférico WRF para la generación de escenarios climáticos regionales para el Perú*. Tesis para optar el título de Licenciado en Física. Escuela Profesional de Física, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Contenido

Glosario.....	6
Resumen.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1. Objetivo	10
1.2. Área de estudio	10
2. REDUCCIÓN DE ESCALA DINÁMICA CON EL MODELO WRF	12
2.1. Conceptos utilizados en reducción de escala dinámica	12
2.1.1. Sistema climático.....	12
2.1.2. Modelo climático global	13
2.1.3. Modelo climático regional.....	14
2.1.4. Ecuaciones primitivas de la atmósfera	14
2.1.5. Clima	16
2.1.6. Variabilidad climática	16
2.1.7. Cambio climático	16
2.1.8. Escenario de emisiones	16
2.1.9. Proyección climática	18
2.1.10. Escenario climático	18
2.1.11. Modelización numérica y uso de información.....	18
2.2. Reducción de escala o regionalización	20
2.2.1. Concepto de reducción de escala	20
2.2.2. Métodos de reducción de escala	20
2.3. Modelo climático regional Weather Research and Forecasting	22
2.3.1. Modelo Weather Research and Forecasting.....	22
2.3.2. Aplicaciones del modelo WRF	22
2.3.3. Módulos del modelo WRF.....	24
2.3.4. Módulo de preprocesamiento	25
2.3.5. Módulo de procesamiento.....	29
2.3.6. Módulo de posprocesamiento	33
2.3.7. Módulo de evaluación.....	33
2.3.8. Parametrizaciones físicas	34

2.3.9. Anidamiento en el modelo WRF	36
3. METODOLOGÍA.....	37
3.1. Esquema general de la generación de escenarios climáticos regionales	37
3.2. Datos.	40
3.2.1. Modelo climático global HadGEM2-ES.....	40
3.2.2. Base de datos PISCO.....	41
3.3. Configuración de la reducción de escala dinámica.....	42
3.3.1. Configuración del dominio de la reducción de escala	42
3.3.2. Configuración de las parametrizaciones físicas	43
3.3. Modelización numérica	46
3.4. Resultados	48
3.4.1. Topografía	48
3.4.2. Distribución espacial de la precipitación.....	50
3.4.3. Ciclo anual de la precipitación.....	53
3.4.4. Precisión estadística de la reducción de escala.....	55
3.4.5. Distribución espacial de cambios en la precipitación al 2050	57
4. CONCLUSIONES.....	60
5. REFERENCIAS	61

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del área de estudio: Perú. La topografía [m] está en colores.	11
Figura 2. Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones. Fuente: IPCC 2007.....	12
Figura 3. Representación esquemática de un modelo climático global. Fuente: Modificado de Edwards, 2011	13
Figura 4. Modelización numérica y necesidades de información. Fuente: Modificado de Torres, 2019.....	19
Figura 5. Métodos de reducción de escala.....	20
Figura 6. Representación de la resolución espacial de la precipitación [mm] del modelo climático global HadGEM2-ES (a) y de la reducción de escala utilizando el modelo WRF a 16 km sobre Lima metropolitana.	21
Figura 7. Módulos principales y complementarios del modelo WRF, y aplicaciones de cada módulo.	24
Figura 8. Archivo de configuración namelist.wps con información sobre el dominio de modelización.	25
Figura 9. Representación esquemática de la condición inicial y de contorno para la modelización con el modelo WRF.	29
Figura 10. Representación esquemática de las coordenadas verticales isobáricas (modelo climático global) y las híbridas-presión (utilizadas en el modelo WRF). Fuente: Modificado de NCAR, 2019. 30	
Figura 11. Variables dinámicas y termodinámicas en las rejillas horizontal y vertical desplazada Arakawa tipo C. Fuente: Modificado de Shamarock, 2019.	31
Figura 12. Representación esquemática de la integración de ecuaciones en el modelo WRF.....	32
Figura 13. Representación esquemática de procesos de subrejilla en un modelo climático global. Fuente: https://climate-dynamics.org/paris-and-the-future-of-clouds/	34
Figura 14. Representación esquemática de las principales parametrizaciones físicas en el modelo WRF.	35
Figura 15. Configuraciones de anidamientos permitidos: (a) Anidado telescópico y (b) Anidado al mismo nivel. Configuraciones no permitidas: (c) Anidados superpuestos y (d) Anidado de dos dominios padre. Fuente: Modificado de Shamarock 2019.	36
Figura 16. Fases para la generación de escenarios climáticos regionales.	39
Figura 17. Diagrama de la arquitectura y componentes del modelo HadGEM2-ES. Fuente: Alexander 2015	40
Figura 18. Distribución de estaciones utilizadas en la construcción de PISCO (círculo azul) y su evaluación (círculo rojo).	41
Figura 19. Dominios utilizados en la reducción de escala dinámica y su resolución espacial: Suramérica 48x48 km y su anidado de Perú 16x16 km. En colores la topografía [m].	42
Figura 20. Proceso de modelización con re-inicialización cada 6 años con el modelo WRF.....	47
Figura 21. Topografía [metros], a) en el modelo global HadGEM2-ES, b) en la reducción de escala a 48 km y c) en la reducción de escala a 16 km, d) Perfil de la topografía en la latitud 12 S.	49

Figura 22. Distribución espacial de los acumulados de la precipitación trimestral [mm] sobre Perú para el periodo 1981 – 2005.	52
Figura 23. Coeficiente de correlación del ciclo anual de la precipitación para 1981 al 2005 sobre Perú.	54
Figura 24. Distribución espacial de RMSE (magnitud) y BIAS (signo) para 1981 al 2005 sobre Perú.	56
Figura 25. Distribución espacial de cambios en la precipitación trimestral [mm] para el periodo 2036-2065 respecto al periodo de referencia 1981-2005.	59

Índice de Tablas

Tabla 1. Trayectorias representativas de concentración en CMIP5	17
Tabla 2. Variables mínimas requeridas para el ingreso en el modelo WRF	27
Tabla 3. Configuración física utilizada en la reducción de escala dinámica	46

Glosario

ARW	: Advanced Research WRF
CMIP	: Coupled Model Intercomparison Project
ENSO	: El Niño-Oscilación del Sur
HadGEM2-ES	: Hadley Centre Global Environment Model version 2 Earth-System
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change
PISCO	: Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations
MCG	: Modelo climático global
MCR	: Modelo climático regional
MET	: Model Evaluation Tools
NCAR	: National Center for Atmospheric Research
NMM	: Nonhydrostatic Mesoscale Model
RCP	: Representative Concentration Pathways
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
UPP	: Unified Post Processor
WPS	: WRF Preprocessing System
WRF	: Weather Research and Forecasting

Reducción de escala dinámica del modelo global HadGEM2-ES con el modelo atmosférico WRF para la generación de escenarios climáticos regionales para el Perú

Resumen

La presente tesis presenta una descripción de la reducción de escala dinámica, para la generación de información proyectada hacia el 2050 sobre el territorio del Perú para el análisis de posibles cambios en la precipitación para el periodo comprendido entre los años 2036-2065 respecto al periodo de referencia 1981-2005 en base a las condiciones iniciales y de contorno del modelo global HadGEM2-ES en el escenario de emisiones RCP 8.5. Se ha realizado en el presente trabajo énfasis en la metodología utilizada; la reducción de escala dinámica mediante el modelo meteorológico “Weather Research and Forecasting” (WRF).

1. INTRODUCCIÓN

La reducción de escala o regionalización dinámica es una técnica que permite obtener información de variables atmosféricas para un determinado lugar considerando las características locales e información de baja resolución proveniente de un modelo climático global.

Los modelos climáticos globales son herramientas que permiten obtener información del sistema climático a diferentes escalas de tiempo en el futuro, pudiendo obtener proyecciones a horas, días, meses o años. Esta información es utilizada en agricultura (manejo del riego, planificación de cultivos, etc.); en recursos hídricos (niveles de ríos, planificación de distribución del agua, etc.), así como en otras actividades como energía y turismo.

En el Perú se presentan una gran diversidad de condiciones atmosféricas, las cuales se deben a sus características geográficas, como la presencia de la cordillera de los Andes, la influencia de patrones de circulación climáticos como el Alta de Bolivia y el Anticiclón del Pacífico Sur. Estas distintas condiciones atmosféricas hacen necesario que se disponga de información con mayor detalle tanto espacial como temporalmente para las distintas de regiones de Perú.

El desarrollo de información para el análisis de proyecciones de escenarios climáticos regionales, es decir, condiciones atmosféricas con información local para las próximas décadas son desarrolladas en base a la aplicación de la reducción de escala de un modelo climático global proveniente del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP, *Coupled Model Intercomparison Project*), utilizando un modelo regional climático.

La primera parte de la tesis desarrolla conceptos utilizados en la reducción de escala dinámica y el modelo atmosférico de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF, *Weather Research and Forecasting*), y la segunda parte presenta una descripción del proceso de generación de escenarios climáticos regionales en base a datos generados del Estudio de vulnerabilidad climática de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro realizado por el

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Finalmente se presenta la evaluación de los resultados de la reducción de escala de la variable precipitación sobre Perú.

1.1. Objetivo

El objetivo de la presente tesis es generar datos de precipitación sobre Perú mediante la reducción de escala dinámica del modelo global HadGEM2-ES, utilizando el modelo regional atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF) para el análisis de cambios posibles de la precipitación al 2050.

Objetivos específicos:

- Realizar la reducción de escala dinámica del modelo global HadGEM2-ES utilizando el modelo regional climático WRF.
- Evaluar la reducción de escala dinámica de la precipitación sobre Perú del modelo global HadGEM2-ES en el periodo 1981-2005.
- Analizar los posibles cambios en la precipitación al 2050 sobre Perú.

1.2. Área de estudio

La presente tesis considera el Perú como área de estudio (Figura 1). El Perú es un país ubicado sobre el lado centro occidental de Suramérica, con una extensión de 1 285 215 km² (MINAM, 2010). Esta limitado por el oeste por el océano pacifico, por el sur por Chile y Bolivia, por el este por Brasil y por el norte por Ecuador y Colombia.

El Perú presente 27 tipos de clima (MINAM, 2010). Esta variedad de climas es debido a varios factores como la confluencia de dos corrientes marinas: la corriente de aguas frías (corriente peruana o de Humboldt) y una corriente de aguas cálidas (corriente El Niño), además de la presencia de la cordillera de los Andes, su ubicación dentro de la zona tropical, así como de la presencia de sistemas atmosféricos como la Alta de Bolivia, el Anticiclón del Pacífico Sur, la Zona de Convergencia Intertropical, entre otros.

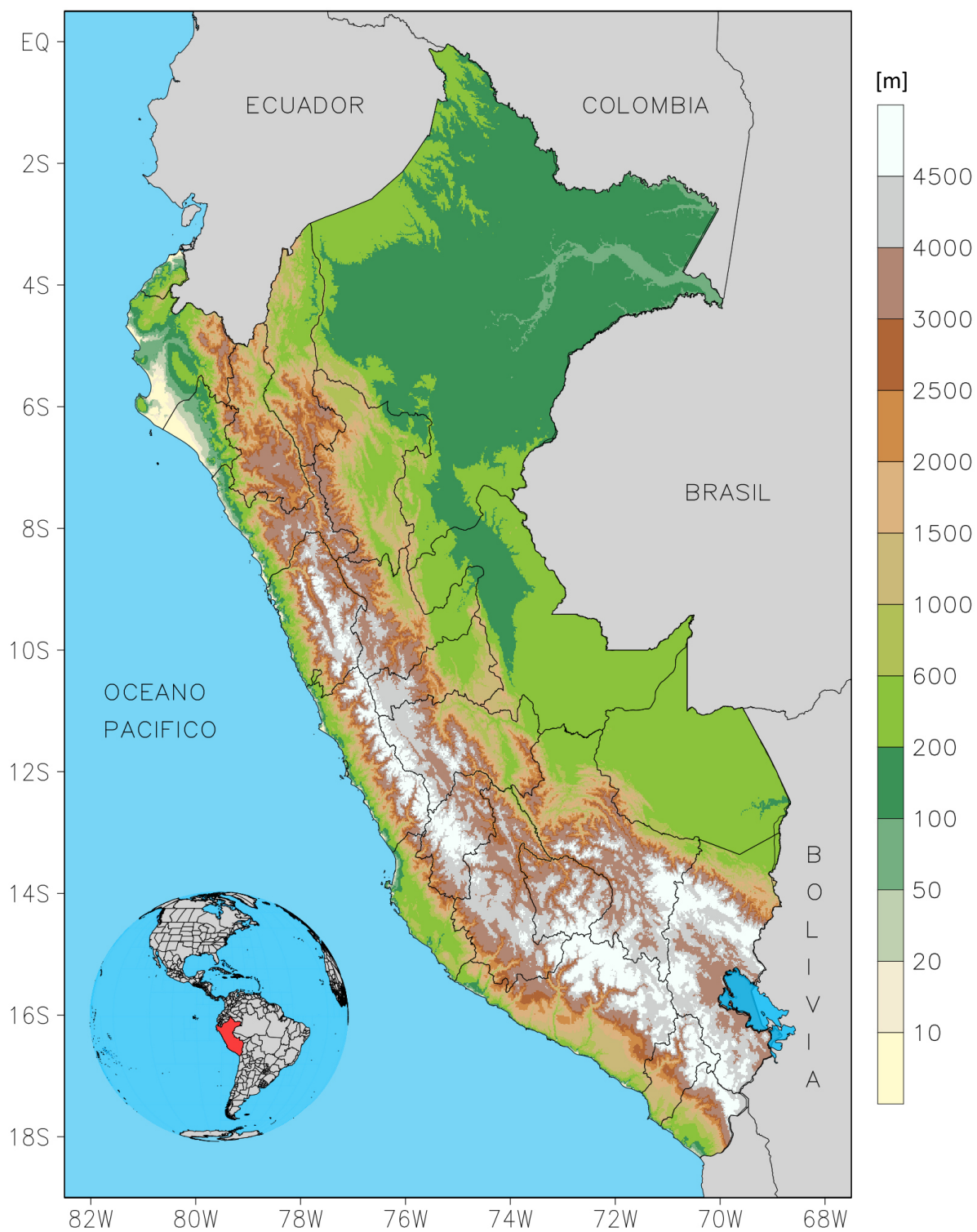


Figura 1. Ubicación del área de estudio: Perú. La topografía [m] está en colores.

2. REDUCCIÓN DE ESCALA DINÁMICA CON EL MODELO WRF

2.1. Conceptos utilizados en reducción de escala dinámica

2.1.1. Sistema climático

El sistema climático es un sistema complejo compuesto de cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera, la criósfera y la biósfera, y de las interacciones entre estas componentes (IPCC, 2018). Este sistema se muestra en la Figura 2, donde se presentan sus componentes, así como las interacciones entre estas.

La variabilidad en el sistema climático es debido a su propia dinámica interna (ciclo de carbono, ENOS, etc.), por forzantes externos (erupciones volcánicas, variaciones solares, etc.) y forzamientos antropogénicos (cambios de la composición de gases en la atmósfera, cambios en el uso de suelos, etc.).

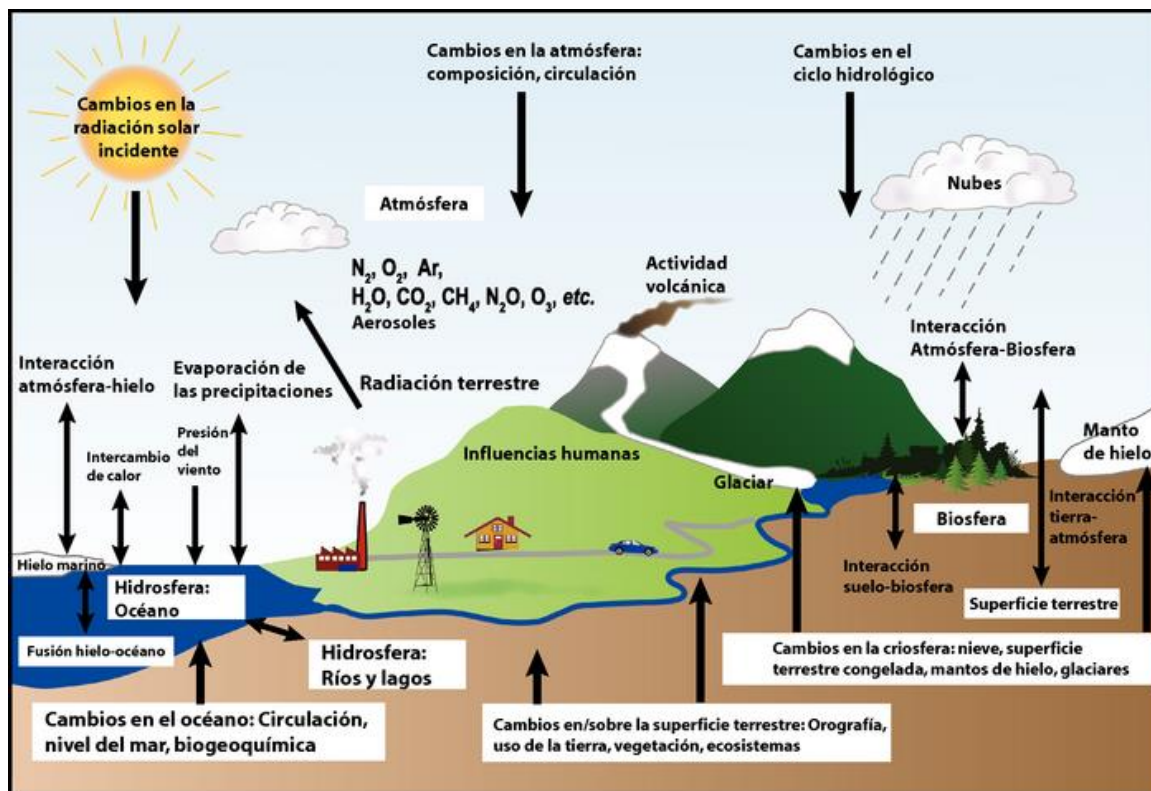


Figura 2. Vista esquemática de los componentes del sistema climático, sus procesos e interacciones. Fuente: IPCC 2007.

2.1.2. Modelo climático global

Un Modelo Climático Global (MCG), es una representación numérica del sistema climático basado en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroalimentación (IPCC, 2018). La representación del sistema climático se realiza mediante rejillas que cubren el planeta a nivel horizontal y vertical, considerando un modelo para cada componente del sistema climático los cuales interactúan entre sí por otro modelo denominado acoplador, por eso se considera a estos modelos como modelos acoplados (Figura 3). Existen actualmente tres tipos de modelos climáticos globales:

- Modelo de Circulación General de la Atmósfera (MCGA): Modelo que solo incluye la componente atmósfera del sistema climático.
- Modelo de Circulación General Océano-Atmosféricos (MCGOA): Modelo que acopla procesos atmosféricos y oceánicos.
- Modelo del Sistema Terrestre (ESM): Modelo que incluye además de la parte atmosférica y oceánica, las interacciones biogeoquímicas (por ejemplo, el ciclo del carbono), así como cambios en la superficie terrestre (por ejemplo, tipos de vegetación). (Charron 2016).

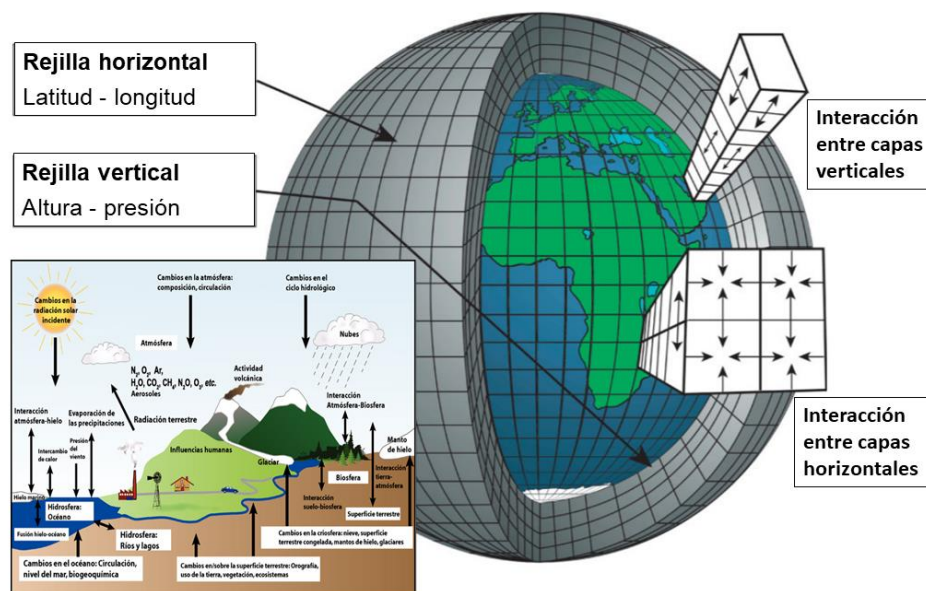


Figura 3. Representación esquemática de un modelo climático global. Fuente: Modificado de Edwards, 2011

2.1.3. Modelo climático regional

Un Modelo Climático Regional (MCR), también denominado modelo de área limitada es un modelo climático desarrollado para la modelización sobre una región específica. Estos modelos han sido mayormente utilizados para la modelización de la componente atmosférica del sistema climático, los cuales utilizan el sistema de ecuaciones primitivas de la atmósfera.

Estos modelos requieren información en sus límites laterales para todas las variables meteorológicas las cuales pueden ser obtenidas de los modelos climáticos globales (Wang et al. 2004).

2.1.4. Ecuaciones primitivas de la atmósfera

Las siete ecuaciones primitivas de la atmósfera consideran las leyes de conservación que gobiernan la dinámica de la atmósfera y son simplificaciones de las ecuaciones de Euler utilizando la aproximación hidrostática aplicada a fluidos la cual supone que en la vertical existe un equilibrio entre la fuerza del gradiente de presión y la fuerza de gravedad, y contiene 7 variables atmosféricas: componente zonal del viento (u), componente meridional del viento (v), componente vertical del viento (w), temperatura (T), presión (p), densidad del aire (ρ) y la proporción en masa de vapor de agua en la parcela de aire (q).

Las primeras tres ecuaciones primitivas están relacionadas a la conservación del momento, es decir, del movimiento y están resumidas en la ecuación 1. En donde se expresa que el cambio en velocidad de un fluido ($V = V(u,v,w)$), asociada a un sistema de referencia (x,y,z) de una parcela de aire depende de las fuerzas aplicadas sobre ella: al gradiente de presión ($\frac{1}{\rho} \nabla p$), a la fuerza de Coriolis ($2\Omega \times V$), el término de la gravedad aparente ($\nabla \phi$) y la fuerza de rozamiento (F). Donde Ω , es la velocidad angular de la Tierra.

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - 2\Omega \times V - \nabla \phi + F \dots (1)$$

La ecuación 2, es la ecuación de la conservación de la masa de una parcela de aire. La que indica que el cambio de la densidad de un fluido (masa por unidad de volumen) en el tiempo es proporcional a la divergencia de la densidad. Esta ecuación expresa además que la masa no cambia, aunque la forma o volumen cambie.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho V) \dots (2)$$

La ecuación del estado de los gases, la cual indica que la densidad está en función de la presión y de la temperatura. Para el caso de aire seco en la atmósfera esta ecuación puede ser expresada mediante la ecuación 3. Donde R es la constante del aire seco.

$$\rho = \frac{p}{RT} \dots (3)$$

La ecuación 4, es la ecuación de conservación de la energía, la cual expresa la primera ley de la termodinámica que indica que la energía de un fluido obedece a un balance. Es decir, que la energía interna de una parcela de aire con una temperatura T, puede cambiar por el calor aportado al sistema (δQ , tasa de calor por unidad de masa) y el trabajo realizado sobre esta ($\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt}$). Donde C_p es el coeficiente de calor específico a presión constante.

$$\delta Q = C_p \frac{dT}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \dots (4)$$

Y finalmente la ecuación 5, expresa la ecuación de conservación de vapor de agua. La cual indica que la variación de la humedad presente en una parcela de aire está relacionada al contenido de agua relativo a los procesos de evaporación (E) y condensación (C), así como el proceso de divergencia de humedad, es decir la humedad transportada hacia o fuera de la parcela.

$$\frac{\partial \rho q}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho V q) + \rho (E - C) \dots (5)$$

Una mayor descripción de las ecuaciones (1) al (5) pueden obtenerse de los textos de Inness y Dorling (2013), y Holton (2004). Adicionalmente, se exponen conceptos relacionados al cambio climático los cuales mostramos a continuación.

2.1.5. Clima

El termino clima, según IPCC 2018, es la representación estadística del tiempo atmosférico en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes durante periodos que pueden abarcar desde meses hasta miles o millones de años. El periodo definido para estudios relacionados al cambio climático es de 30 años.

2.1.6. Variabilidad climática

Al ser el clima una representación estadística de un sistema dinámico como lo es el sistema climático se observa que los valores de clima definidos sobre un determinado periodo han variado a través de los siglos. Es así, que el termino de variabilidad climática indica las variaciones del estado medio y otras características (desviación estándar, eventos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que los fenómenos meteorológicos.

2.1.7. Cambio climático

Se denomina cambio climático a la variación del estado medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante periodos prolongados, generalmente décadas o periodos más largos y que es atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante periodos de tiempo comparables (IPCC 2018).

2.1.8. Escenario de emisiones





Un escenario de emisiones es una representación de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son radiativamente activas como los gases de efecto invernadero, aerosoles, etc. (IPCC 2018).

Estos escenarios de emisión han sido desarrollados con supuestos relacionados al desarrollo demográfico, al desarrollo socioeconómico, la evolución tecnológica, los cambios en la energía y el uso de tierra, etc.

La información proveniente de estos escenarios de emisión es utilizada para la construcción de escenarios de concentraciones los cuales al ser introducidos dentro de un modelo climático global permiten la generación de proyecciones climáticas. Las variaciones en la composición de la atmósfera debido a los cambios en los gases de efecto invernadero y aerosoles, pueden modificar el equilibrio energético del sistema climático.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) para el CMIP versión 5 definió cuatro Trayectorias Representativas de Concentración (RCP, *Representative Concentration Pathway*). Estos RCPs son identificados por el forzamiento radiativo, medida de la influencia en el balance energético de la Tierra debido al factor natural y humano sobre el sistema climático, que ejercen al 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m². Las características de los cuatro RCPs son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Trayectorias representativas de concentración en CMIP5

	Forzamiento radiativo (Tendencia en 2100)	Características
RCP 2.6	2.6 W/m ² 	Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, e implementación de políticas climáticas de adaptación y mitigación.
RCP 4.5	4.5 W/m ² 	Mitigación con desarrollo de tecnologías limpias y una disminución en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Crecimiento poblacional de 8.7 millardos al 2100.
RCP 6.0	6.0 W/m ² 	Mitigación con desarrollo de tecnologías limpias y una disminución en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Crecimiento poblacional de 9.8 millardos al 2100.
RCP 8.5	8.5 W/m ² 	Escasos avances en aplicación de tecnologías y ausencia de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático.

2.1.9. Proyección climática

Un modelo climático es una herramienta para la obtención de información de las condiciones atmosféricas. Por tanto, la adición a este modelo de información de la composición de la atmosfera permitirá obtener información de las posibles condiciones futuras.

Luego, una proyección climática es una respuesta simulada del sistema climático mediante un modelo climático global a diversos escenarios de emisiones o de concentraciones de gases de efecto invernadero y de aerosoles (IPCC 2018).

2.1.10. Escenario climático

Un escenario climático es una representación numérica del clima futuro obtenida en base a las proyecciones climáticas y a la información adicional como el clima actual observado (IPCC 2018). La información proveniente de un escenario climático es una herramienta utilizada en estudios de planeamiento, de vulnerabilidad y adaptación frente a las condiciones atmosféricas cambiantes. Debido a que la información de estos escenarios se basa en escenarios de emisión que a su vez provienen de supuestos, esta información debe trabajarse con cuidado y además debe tenerse presente su incertidumbre asociada.

2.1.11. Modelización numérica y uso de información

La modelización numérica del sistema climático varía de denominación dependiendo del alcance temporal. Por otro lado, dependiendo de esta escala temporal es la importancia de la condición inicial y de contorno en la modelización (Figura 4):

- **Predicción numérica meteorológica:** Genera información desde escala horaria a diaria, la cual puede ser utilizada en el manejo de riego (agricultura), manejo del nivel de ríos (recursos hídricos) o planificación de alertas/evacuaciones (emergencias) o vigilancia sindrómica (salud).
- **Predicción numérica estacional:** Genera información entre un mes a un año, siendo mayormente distribuida con un alcance de 3 o de 6 meses.

Puede ser aplicada en la planificación y oferta de energía, o en la programación de la siembra (agricultura), planificación de recursos y personal (salud y emergencias), planificación de oferta y demanda de recursos hídricos.

- **Predicción numérica decadal:** Genera información sobre la escala mayor a un año hasta décadas. Su aplicación puede darse en la planificación de cultivos (agricultura), diseño de estructuras para el turismo, así como planificación del sistema de salud.
- **Proyección climática:** Genera información sobre la escala de décadas. Esta modelización numérica contiene el uso de escenarios de emisiones. La aplicación de esta información es utilizada en estudios sobre el cambio de suelos para la agricultura, gestión de futuros mercados en el rubro energía entre otros.

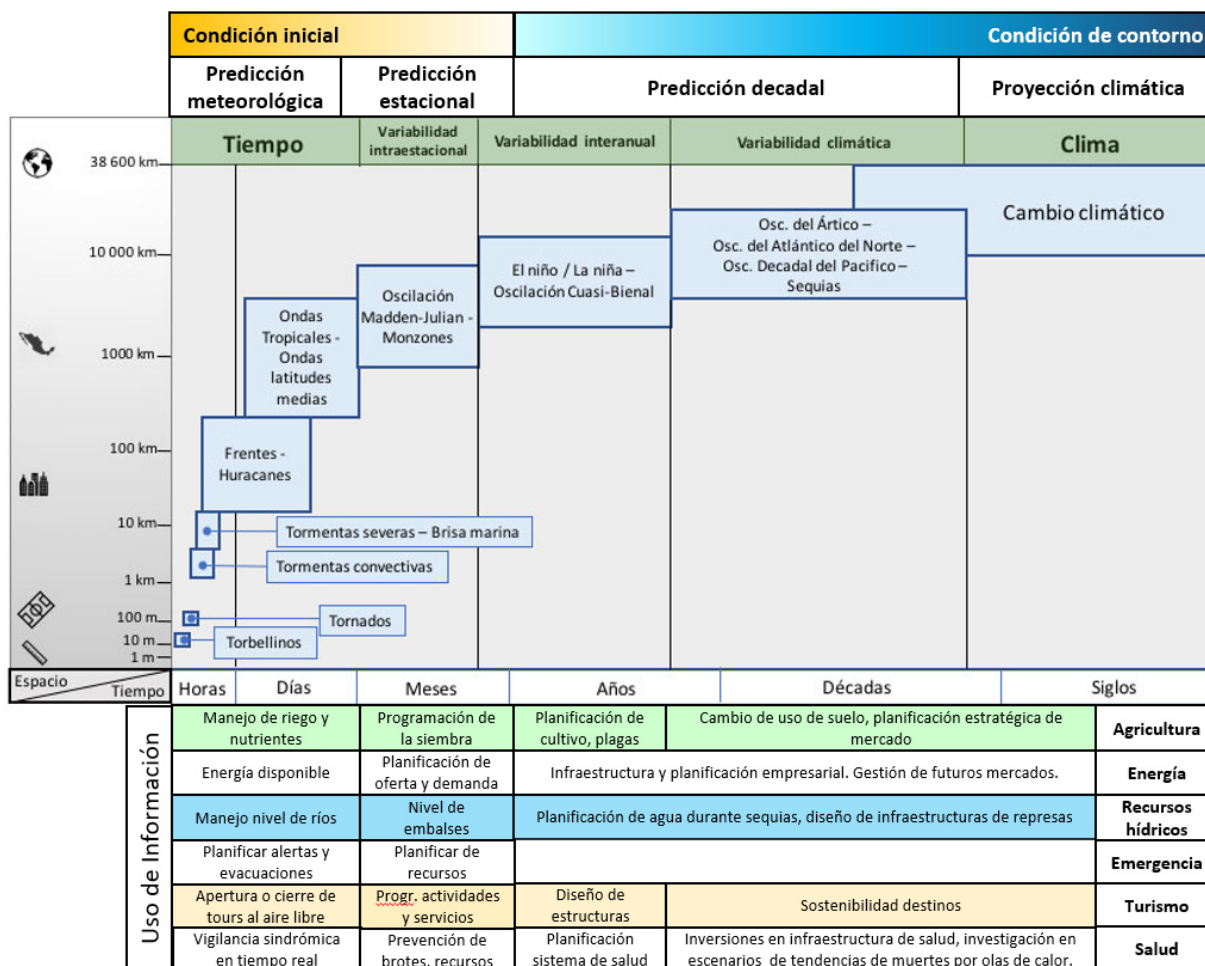


Figura 4. Modelización numérica y necesidades de información. Fuente: Modificado de Torres, 2019

2.2. Reducción de escala o regionalización

2.2.1. Concepto de reducción de escala

Según el IPCC 2018, la reducción de escala, regionalización, proyección local o downscaling (en inglés), es un método que consiste en extraer información local a regional desde modelos o análisis de datos a mayor escala, siendo estos datos mayormente provenientes de un modelo climático global.

2.2.2. Métodos de reducción de escala

Existen tres métodos de reducción de escala o regionalización según Maraun (2010), mostradas en la Figura 5. El primero es la reducción de escala estadística no paramétrica, el segundo la reducción de escala estadística paramétrica y finalmente la reducción de escala dinámica.

El uso de métodos para una reducción de escala es debido a la limitada resolución espacial de los modelos climáticos globales cuyas rejillas son aproximadamente de 100 km. Esta resolución gruesa de los modelos globales no permite representar de manera explícita el desarrollo de algunos procesos físicos como el de las nubes.

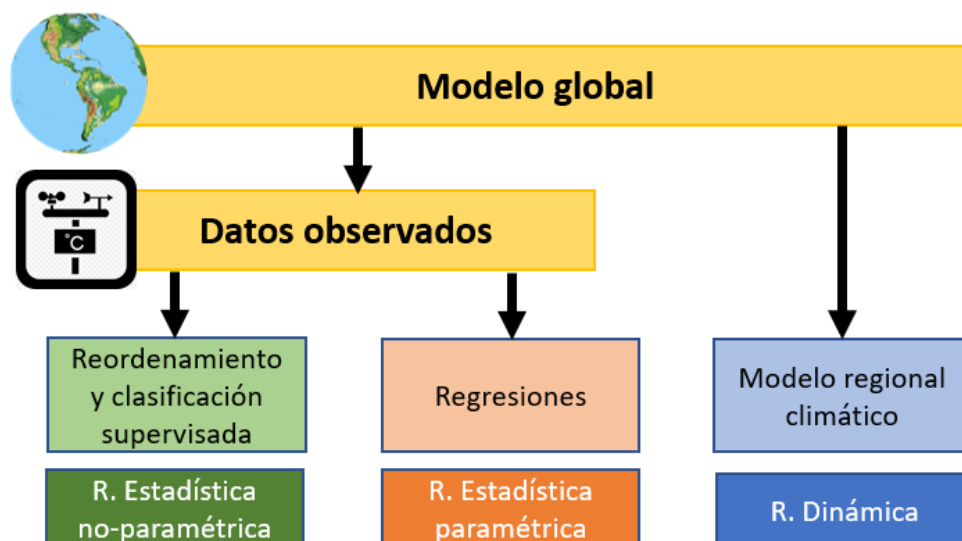


Figura 5. Métodos de reducción de escala

A continuación, se presenta una descripción de cada uno de los tres métodos:

- a) Reducción de escala estadística no paramétrica:** Este método se basa en la obtención de información de variables atmosféricas en superficie como precipitación y temperatura en puntos de estación donde se dispone de datos observados, mediante el uso de reglas probabilísticas como reordenamiento y la clasificación supervisada, etc.
- b) Reducción de escala estadística paramétrica:** Consiste en la aplicación de modelos estadísticos para obtener una función que relacione algunas características de los datos de modelos globales ya sea en superficie o en alguna altura específica con información observada en superficie en puntos de estación.
- c) Reducción de escala dinámica:** Este método está basado en el uso de un modelo climático regional. Este modelo climático regional, recibe como condición de entrada y de contorno los datos en niveles de superficie y altura de un modelo climático global y mediante las ecuaciones primitivas de la atmósfera y características geográficas locales permite obtener información a una resolución espacial más fina sobre una determinada región, como ejemplo en la Figura 6, se presenta la distribución de precipitación vista desde el modelo global HadGEM2-ES y su respectiva reducción de escala a 16 km sobre Lima Metropolitana.

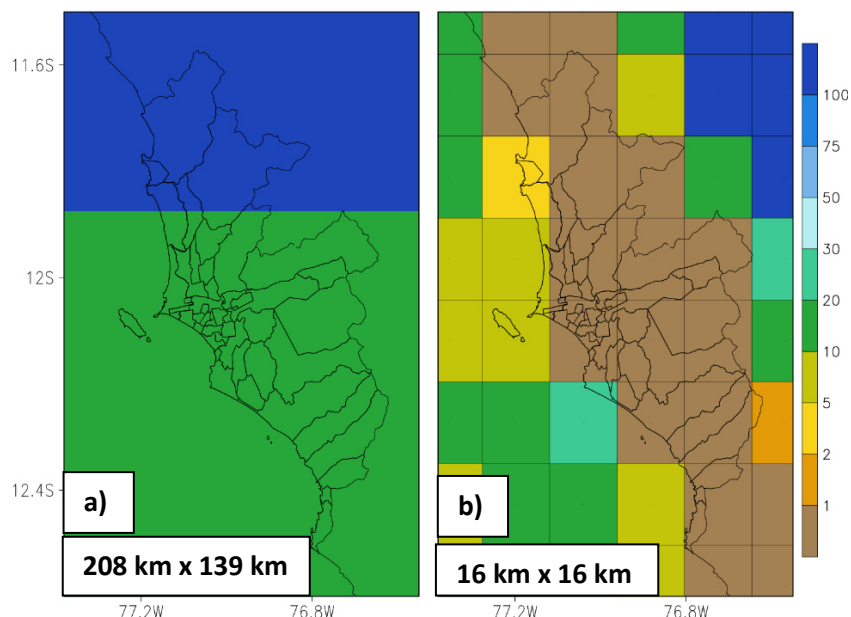


Figura 6. Representación de la resolución espacial de la precipitación [mm] del modelo climático global HadGEM2-ES (a) y de la reducción de escala utilizando el modelo WRF a 16 km sobre Lima metropolitana.

2.3. Modelo climático regional Weather Research and Forecasting

2.3.1. Modelo Weather Research and Forecasting

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo climático regional atmosférico designado para la predicción numérica del tiempo y la investigación (Powers et al. 2016), el cual tiene el soporte de la *National Center for Atmospheric Research* (NCAR).

El modelo WRF, es un sistema numérico que dispone de dos núcleos dinámicos, es decir, dos sistemas que resuelven de manera distinta las ecuaciones de la atmósfera: el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM) y el Advanced Research WRF (ARW), además de disponer una arquitectura que permite el paralelismo computacional. En la presente monografía se realizará una descripción del modelo ARW.

2.3.2. Aplicaciones del modelo WRF

Las diferentes aplicaciones obtenidas por el uso del modelo WRF se deben a que la componente atmosférica del modelo ha sido acoplada a modelos más específicos relacionados a la parte química, hidrológica entre otros, denominados módulos de procesamiento (Figura 5). A continuación, se presenta una descripción breve de las diferentes aplicaciones del modelo WRF:

- a) **Predicción numérica del tiempo:** Es empleado de manera operacional por distintos servicios meteorológicos, suministrando información de variables atmosféricas en superficie y a distintas alturas, se puede incluir la asimilación de datos por medio del paquete WRFDA.
- b) **Predicción numérica estacional:** Utiliza el mismo módulo de procesamiento de la predicción numérica del tiempo, sin embargo, al utilizar la actualización de la temperatura superficial del mar permite obtener simulaciones para varios meses. Como ejemplo se tiene la aplicación de la precipitación sobre Perú a tres meses de pronóstico (SENAMHI 2017).
- c) **Predicción de gases contaminantes y partículas:** El acoplamiento del modelo WRF y su modelo químico (Chem). Como ejemplo tenemos la

aplicación sobre Lima metropolitana para el cálculo de variables como Monóxido de Carbono, material particulado PM2.5 y PM10 entre otros (Sanchez-Ccoyllo et al. 2018)

- d) **Predicción de ciclones tropicales:** El cual se basa en la aplicación del Hurricane WRF (HWRF), el cual aplicado principalmente en Centroamérica y Norteamérica.
- e) **Predicción numérica hidrológica:** Basado en el WRF Hydrological Modeling Extension Package (WRF-Hydro), el cual permite la representación de variables como la precipitación, la infiltración, el derretimiento de nieve, entre otros.
- f) **Predicción de incendios forestales:** Basado en la aplicación del WRF y *wildland fire-behavior physics package* (WRF-Fire). Esto permite calcular la tasa de propagación del fuego en función del viento local, la pendiente y propiedades del combustible como la humedad.
- g) **Meteorología urbana:** Esta basado en el *WRF-Urban*, el cual permite representar los impactos de la urbanización sobre las condiciones atmosféricas, teniendo aplicaciones hacia las áreas de salud pública y recursos hídricos.
- h) **Predicción de energía solar:** Utiliza el WRF-Solar, el cual es una configuración del modelo WRF que incluye modificaciones en el seguimiento solar y parametrizaciones, permitiendo una mejora en la representación de aerosol-radiación, nube aerosol e interacciones nube-radiación, entre otros.
- i) **Predicción en regiones polares:** Basado en el Polar WRF, y contiene opciones para una representación más precisa de las condiciones en altas latitudes y capas de hielo. Esta incluye la representación fraccional de hielo marino, entre otros.
- j) **Escenarios climáticos regionales:** Es una extensión de la aplicación de la modelización estacional en la cual se considera como condición inicial un modelo global perteneciente al Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), donde se realiza una actualización tanto de las condiciones iniciales y de contorno atmosféricas como oceánicas.

2.3.3. Módulos del modelo WRF

De aquí en adelante se considerará el análisis del núcleo dinámico ARW del modelo WRF. El modelo WRF es un sistema compuesto por módulos o paquetes, los cuales desarrollan una tarea específica. Siendo cuatro los módulos principales (Figura 7):

- Módulo de preprocesamiento (WRF *Preprocessing System*, WPS).
- Módulo de procesamiento (WRF *Model*, WRF).
- Módulo de posprocesamiento (*Unified Post Processor*, UPP)
- Módulo de evaluación (*Model Evaluation Tools*, MET).

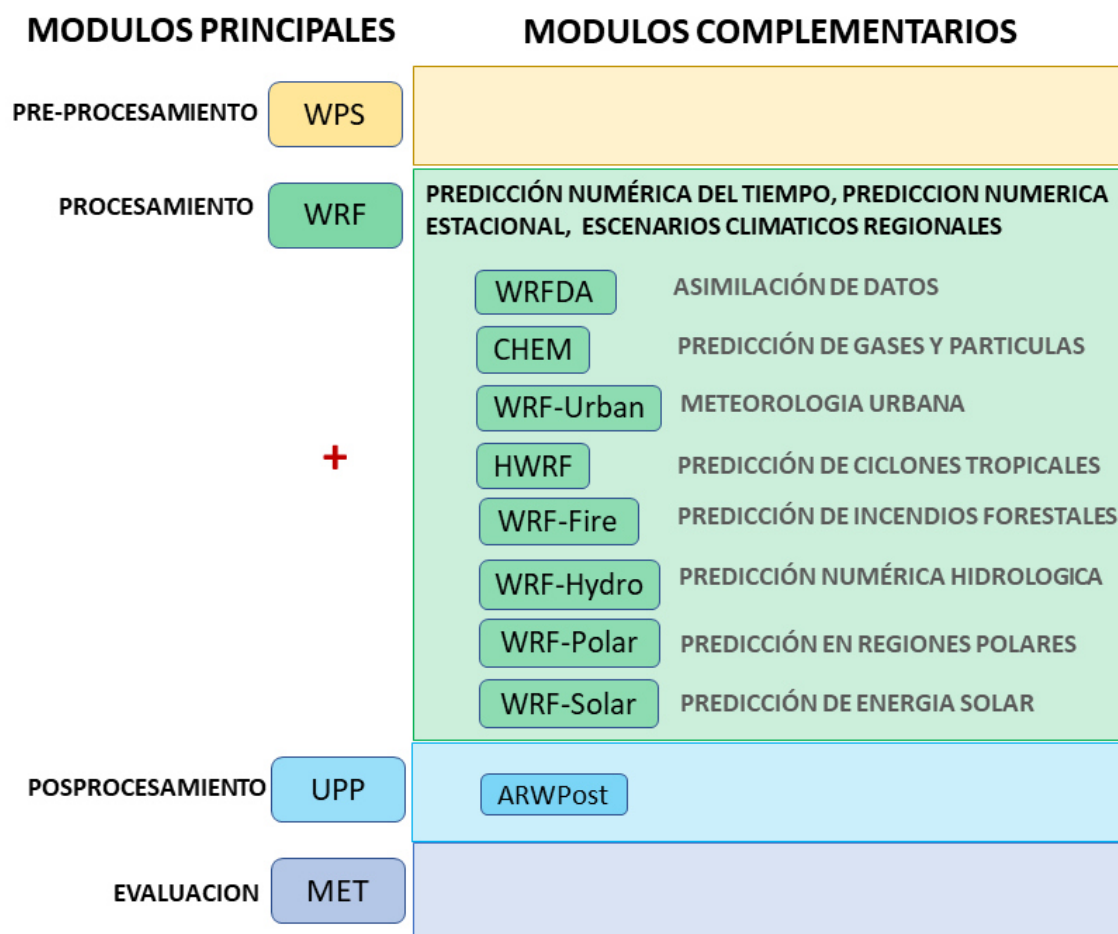


Figura 7. Módulos principales y complementarios del modelo WRF, y aplicaciones de cada módulo.

2.3.4. Módulo de preprocesamiento

El módulo de preprocesamiento, *WRF Preprocessing System* (WPS), es el encargado de preparar la información necesaria para que se construyan las condiciones iniciales y de contorno para la modelización.

A continuación, se presenta los pasos dentro del preprocesamiento:

a) Selección de dominio de simulación: Para esta primera parte se utiliza el programa *Domain Wizard*, el cual es una interfaz en Java que permite delimitar la región para la modelización, la proyección cartográfica, la resolución espacial horizontal, así como el número de regiones de modelización. Toda esta información del dominio de modelización es almacenada en dos archivos de configuración, el archivo *namelist.wps* utilizada en el preprocesamiento y el archivo *namelist.input* utilizada en el procesamiento. *Domain Wizard* es disponible desde la página web: <https://esrl.noaa.gov/gsd/wrfportal/DomainWizard.html>

Como ejemplo la figura 8, presenta un parte de un archivo *namelist.wps* donde se indica que se utilizara una proyección cartográfica Mercator, utilizada para zonas tropicales como Perú, con datos geográficos a 10 minutos, aproximadamente 20km, para un dominio de modelización a 48 km tanto en la dirección x (longitud), como en la dirección y (latitud).

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 2,
start_date = '2037-09_30_00:00:00', '2037-09_30_00:00:00',
end_date = '2037-11-20_00:00:00', '2037-11-20_00:00:00',
interval_seconds = 21600,
/
&geogrid
i_parent_start = 1,34,
j_parent_start = 1,72,
geog_data_res = '10m', '5m',
dx = 48000,
dy = 48000,
map_proj = 'mercator',
/
```

Figura 8. Archivo de configuración *namelist.wps* con información sobre el dominio de modelización.

b) Generación de la base geográfica: El modelo WRF dispone de datos geográficos de topografía, tipo de suelo, albedo, entre otras variables a diferentes resoluciones espaciales en un dominio global. El ejecutable ***geogrid.exe***, interpola las diferentes variables geográficas a la resolución horizontal de modelización dada en el archivo *namelist.wps* y las une en un nuevo archivo en formato NetCDF denominado *geo_em.d01.nc*, variables que formaran parte de las condiciones de contorno en la modelización. El método de interpolación utilizado para cada variable es definido dentro del archivo *GEOGRID.TBL*.

c) Descompresión y selección de variables globales: Como se indicó anteriormente un modelo regional requiere de la información de un modelo climático global para sus condiciones de contorno o límites laterales. Es así como el ejecutable ***ungrib.exe*** permite la descompresión de datos atmosféricos de un modelo global el cual se encuentra en formato GRIB, el cual es un archivo binario comprimido, y luego selecciona las variables atmosféricas, oceánicas y de suelo a ser utilizadas como condiciones iniciales y de contorno en la modelización.

La Tabla 2, presenta las variables mínimas requeridas para la modelización con el modelo WRF. Este grupo está conformado por variables atmosféricas en superficie como en altura, estas últimas deben estar en niveles isobáricos, es decir, variables situadas en un mismo nivel de presión. También deben ser disponibles la humedad y la temperatura del suelo como mínimo en dos niveles del subsuelo y finalmente una variable que ayude a identificar las áreas de continente y océanos denominada máscara. Todas estas variables son definidas en un archivo denominado *Vtable*.

Cuando se realiza modelizaciones climáticas es necesario incluir las variables temperatura superficial del mar (TSM), a las variables ya mencionadas en el párrafo anterior.

Tabla 2. Variables mínimas requeridas para el ingreso en el modelo WRF

Tipo de variable	Sigla	Variable	Unidad	Notas
Atmosféricas en 3 dimensiones	TT	Temperatura del aire	K	
	RH	Humedad relativa	%	No utilizada si existe humedad específica.
	SPECHUMD	Humedad específica	Kg/Kg	
	UU	Viento zonal	m/s	
	VV	Viento meridional	m/s	
Atmosféricas en 2 dimensiones	PSFC	Presión superficial	Pa	
	PMSL	Presión a nivel del mar	Pa	
	SKINTEMP	Temperatura superficial	K	
	TT	Temperatura a 2 metros	K	
	RH	Humedad relativa a 2 metros	%	
	SPECHUMD	Humedad específica a 2 metros	Kg/Kg	No utilizada si existe humedad específica.
	UU	Viento zonal a 10 metros	m/s	
	VV	Viento meridional a 10 metros	m/s	
Suelo	STttbbb	Temperatura del suelo	K	
	SMttbbb	Humedad del suelo	m ³ /m ³	
	LANDSEA	Mascara océano-continente	Fracción	

d) Interpolación horizontal de las variables atmosféricas: Luego de que se han seleccionado las variables atmosféricas, del suelo y de ser el caso la temperatura superficie del mar para modelizaciones climáticas, estas son interpoladas a la resolución espacial definida para la modelización que se encuentra dentro del archivo *namelist.wps*. Los 9 métodos de interpolación para las variables atmosféricas, oceánicas y de suelo son definidas en el archivo METGRID.TBL y ellas son (NCAR, 2019):

- Interpolación bilineal de cuatro puntos.
- Interpolación parabólica superpuesta de dieciséis puntos.
- Interpolación promedio simple de cuatro puntos.
- Interpolación promedio ponderado de cuatro puntos.
- Interpolación promedio simple de dieciséis puntos.
- Interpolación promedio ponderado de dieciséis puntos.
- Interpolación del vecino cercano.
- Interpolación de búsqueda de amplitud primera.
- Promedio de rejilla del modelo.

Luego estas variables atmosféricas, oceánicas y de suelo son unidas a las variables geográficas en un solo archivo en formato NetCDF el cual tiene el prefijo de *met_em*. Estas acciones son realizadas con el ejecutable ***metgrid.exe***.

2.3.5. Módulo de procesamiento

El módulo de procesamiento es el encargado de construir las condiciones iniciales y de contorno, y luego realizar la modelización para el dominio seleccionado. Esta parte es controlada por medio del archivo de configuración *namelist.input*.

A continuación, se presenta las acciones desarrolladas en este módulo:

a) Construcción de las condiciones iniciales y de contorno: Desde los datos de variables atmosféricas, oceánicas, de suelo y geográficas obtenidas del módulo de preprocesamiento, el ejecutable **real.exe** construye la condición inicial que corresponde a los datos del primer tiempo de la información del modelo climático global (Figura 8), y las condiciones de contorno que son los bordes rectangulares de los datos en cada paso de tiempo (Figura 9).

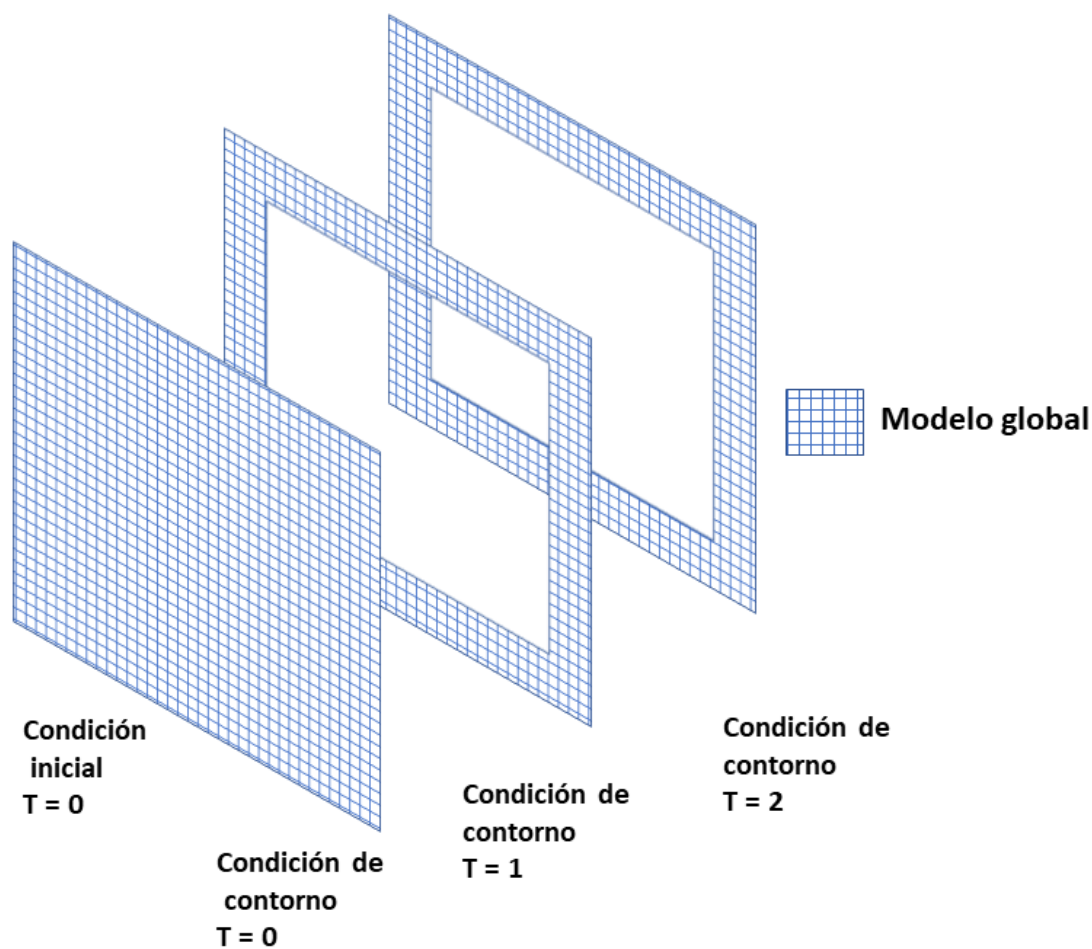


Figura 9. Representación esquemática de la condición inicial y de contorno para la modelización con el modelo WRF.

Durante el proceso de construcción de las condiciones iniciales y de contorno, también se realiza la interpolación de coordenadas verticales isobáricas a coordenadas siguiendo el terreno (denominada sigma) o a híbridas-presión en la última versión del modelo que serán utilizadas en la modelización (Figura 10).

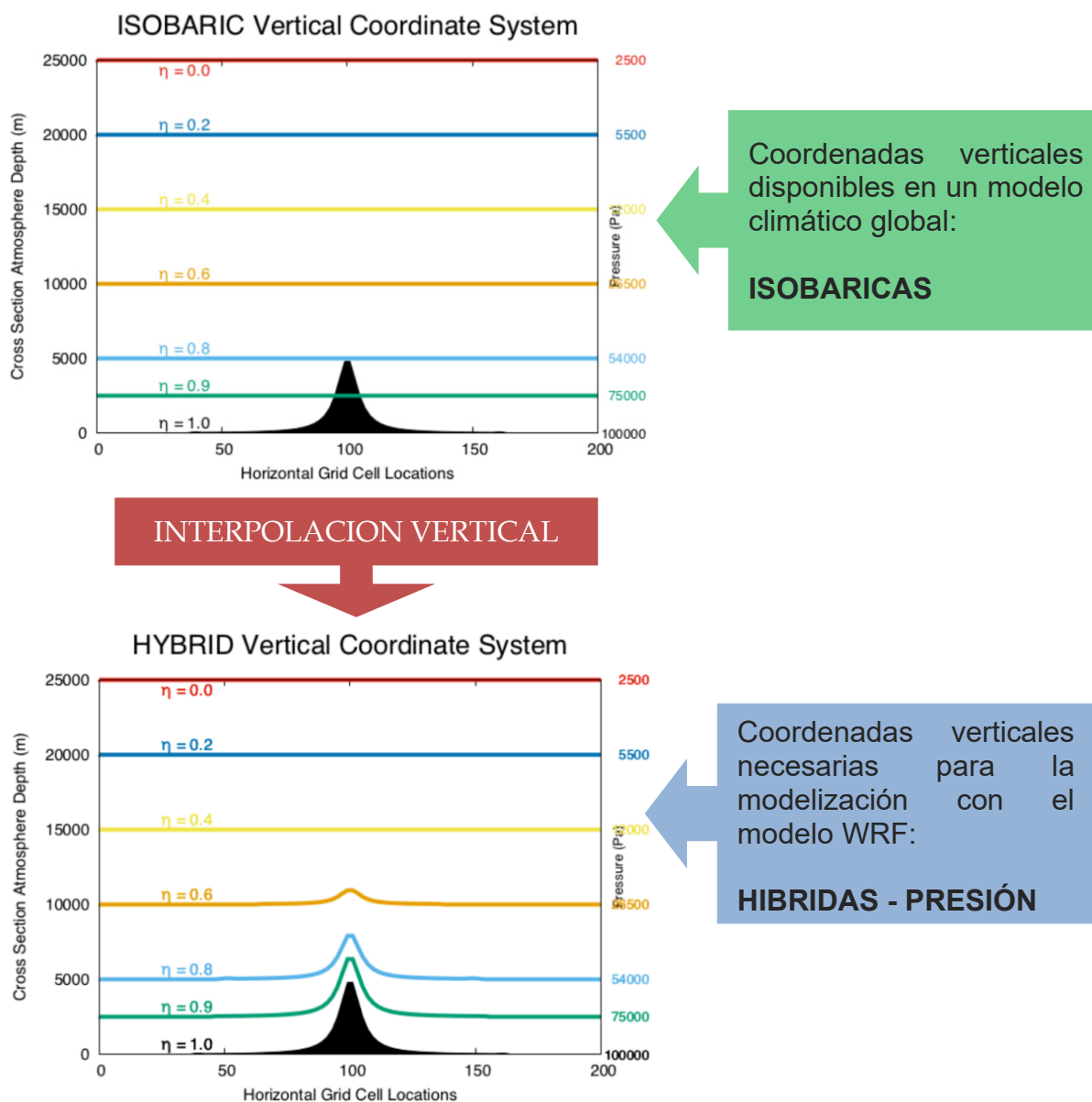


Figura 10. Representación esquemática de las coordenadas verticales isobáricas (modelo climático global) y las híbridas-presión (utilizadas en el modelo WRF). Fuente: Modificado de NCAR, 2019.

b) Integración numérica: El núcleo dinámico ARW integra las ecuaciones de Euler no hidrostáticas en forma de flujo, usando la presión hidrostática como una variable independiente y la resolución de las ecuaciones se realiza mediante el esquema de integración del tiempo de Runge-Kutta (RK3) (Shamarock, 2019).

Las ecuaciones de Euler se resuelven para cada rejilla por cada paso de tiempo. El ARW utiliza la rejilla desplazada Arakawa tipo C para la ubicación de las variables dinámicas (velocidad) y termodinámicas (humedad, temperatura). La Figura 11, presenta la distribución de las variables dentro de cada rejilla considerando la escala horizontal y vertical. Las dimensiones de cada una de las rejillas son dadas por Δx y Δy . Mientras que $\Delta \eta$ es la dimensión de la rejilla vertical considerando un nivel sigma, es decir, coordenada siguiendo el terreno.

En la rejilla desplazada tipo C, las variables de masa y variables termodinámicas (θ) se ubican al centro de la rejilla, estas representan el promedio de esa variable en cada rejilla. Mientras las variables dinámicas, es decir, el viento en cada dirección es ubicado en los puntos u, v, y w, es decir, sobre los puntos intermedios de los bordes de las rejillas.

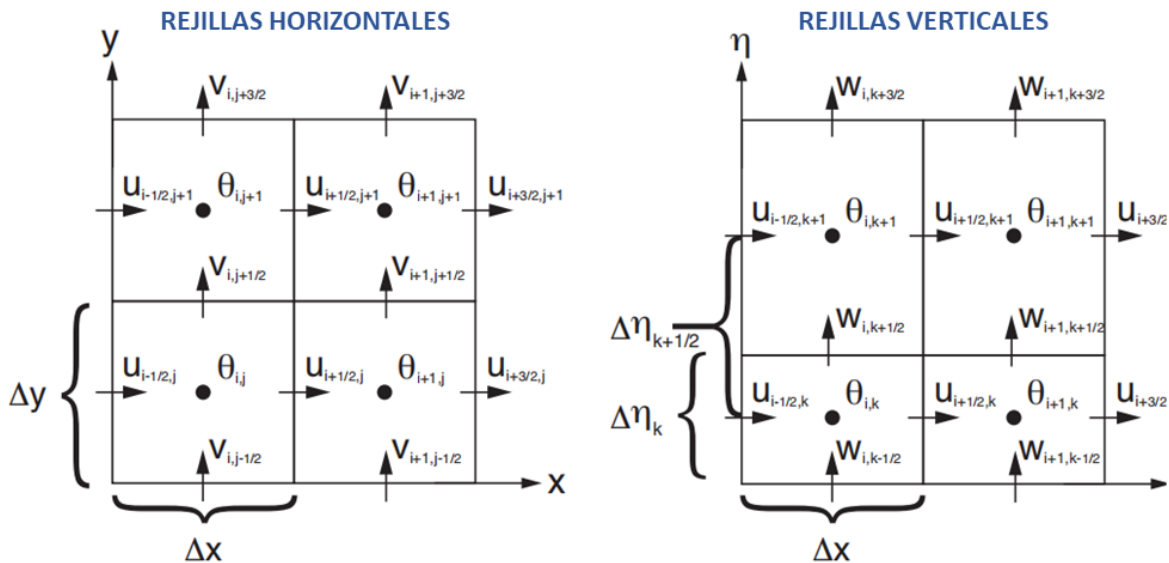


Figura 11. Variables dinámicas y termodinámicas en las rejillas horizontal y vertical desplazada Arakawa tipo C.
Fuente: Modificado de Shamarock, 2019.

La Figura 12, es una representación esquemática del proceso de la integración de ecuaciones en el modelo WRF (núcleo dinámico ARW). Las ecuaciones que utiliza el modelo WRF se inicializan con las condiciones iniciales, que corresponden a los datos del primer tiempo ($T=0$) del modelo global interpolado a la resolución horizontal definida para la modelización. Estas ecuaciones se resuelven libremente de acuerdo con el paso de tiempo de integración definido en el archivo *namelist.input*, siendo mayormente cada 3 minutos, hasta que exista una condición de contorno que actualice los límites laterales de la modelización (marcos en color azul, Figura 12).

Esto indica que el primer tiempo de la modelización solo es data interpolada del modelo global, y que la información valida del proceso de reducción de escala dado por el modelo regional WRF solo pertenece a una región inferior a los límites de la simulación, ya que se debe desestimar el área perteneciente a la condición de contorno denominada zona de relajación.

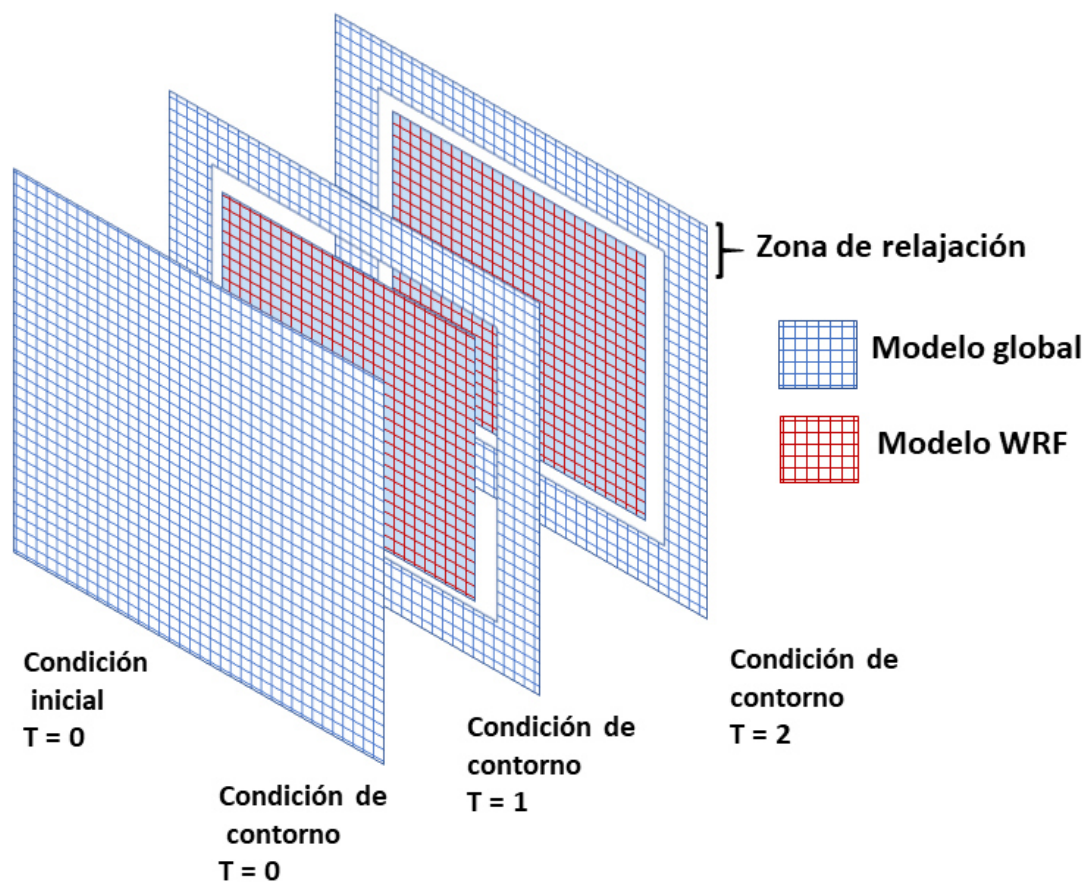


Figura 12. Representación esquemática de la integración de ecuaciones en el modelo WRF.

2.3.6. Módulo de posprocesamiento

El resultado de la modelización produce información que se encuentra en rejillas horizontales y verticales desplazadas tipo C, y en coordenadas verticales siguiendo el terreno o a híbridas-presión, las cuales no son de un formato fácil de leer.

Actualmente existen dos módulos de posprocesamiento: el Unified Post Processor (UPP) y el WRFPost, siendo más utilizado el primero debido a que permite obtener el resultado de la modelización en el formato GRIB.

El UPP realiza la interpolación vertical de coordenadas de sigma (siguiendo el terreno) o de híbridas-presión, a coordenadas isobáricas. Además de cambiar la distribución de las variables dentro de las rejillas horizontales desplazadas Arakawa tipo C a rejillas regulares.

2.3.7. Módulo de evaluación

El módulo de evaluación, Model Evaluación Tools (MET), es un módulo independiente al modelo WRF, sin embargo, es una herramienta útil para la evaluación de los resultados de la modelización.

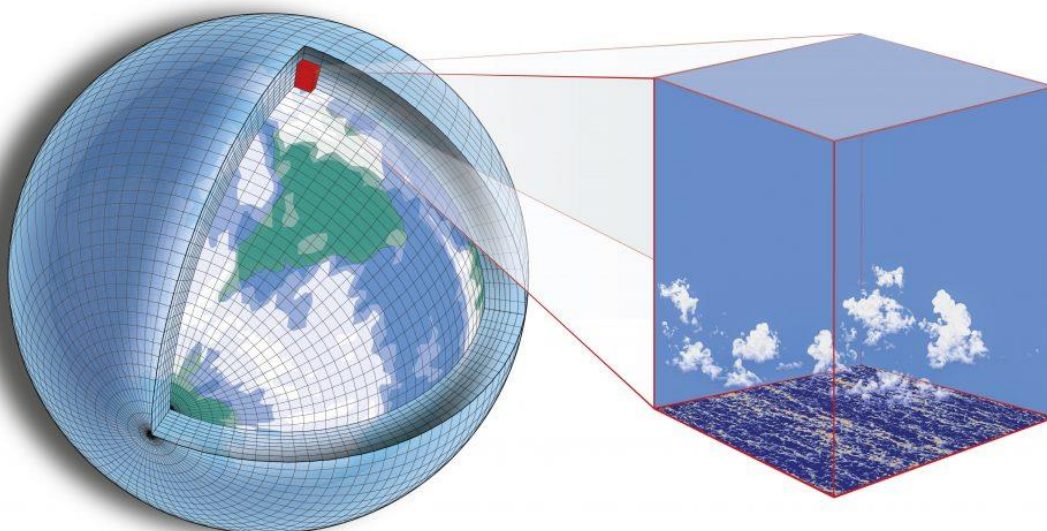
El MET provee varias técnicas de evaluación las cuales son:

- Verificación estadística entre data del modelo en rejilla y observaciones en puntos de estación.
- Verificación estadística entre data del modelo en rejilla y observaciones en rejilla.
- Métodos de verificación espacial para comparar data del modelo en rejilla respecto a observaciones en rejilla usando enfoques de vecindades, basado en objetos y descomposición de intensidad-escala.
- Métodos de verificación probabilista y ensamblados entre data del modelo en rejilla y observaciones en punto de estación o en rejilla.

2.3.8. Parametrizaciones físicas

Una parametrización física según el IPCC 2013, es una técnica utilizada para representar procesos que no es posible resolver explícitamente como consecuencia de la resolución espacial o temporal de un modelo climático global (procesos a escala de subrejilla), mediante relaciones existentes entre las variables en mayor escala resueltas por el modelo climático global y el efecto, promediado en área o a lo largo del tiempo, de tales procesos de escala subrejilla.

Como ejemplo la Figura 13, presenta un grupo de nubes dentro de una rejilla, lo que indica procesos de subrejilla, los cuales no pueden ser descritos por las ecuaciones primitivas de la atmosfera. Sin embargo, su efecto puede ser descrito considerando una función empírica que represente de manera promedio y/o relativo al área de influencia dentro de la rejilla del grupo de nubes, siendo esta función denominada una parametrización física relativa a este proceso.



*Figura 13. Representación esquemática de procesos de subrejilla en un modelo climático global.
Fuente: <https://climate-dynamics.org/paris-and-the-future-of-clouds/>*

El modelo WRF (núcleo ARW) dispone de cinco principales grupos de parametrizaciones físicas. La Figura 14, presenta las parametrizaciones, así como los procesos de interacciones entre ellas.

a) Parametrización de la radiación: Permite estimar los flujos radiativos en la superficie y distintos niveles, para la radiación en onda corta y onda larga.

b) Parametrización de la capa límite: Permite calcular el intercambio de masa, momento y energía debido a la turbulencia debajo de la capa limite planetaria.

c) Parametrización de la convección cúmulos: Permite representar los flujos verticales ascendentes y descendentes no resueltos debido a escala de subrejilla.

d) Parametrización de la microfísica: Permite resolver procesos de condensación y evolución del agua en distintas fases sólida, líquida y mixta.

e) Parametrización de superficie: Permite representar el intercambio calor, humedad y momento entre la atmósfera y superficie del suelo (capa superficial). Además, contiene un modelo que permite calcular la evolución de la temperatura y humedad en distintas capas del suelo.

Además, posee parametrizaciones para casos especiales como convección poco profunda, procesos urbanos entre otros.

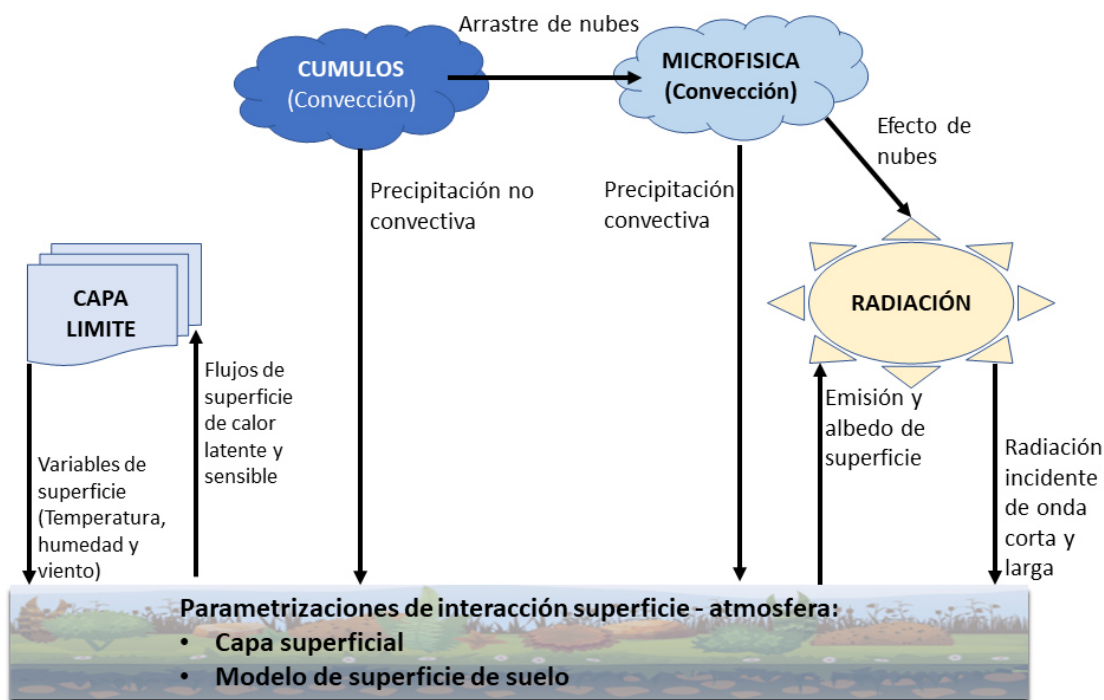


Figura 14. Representación esquemática de las principales parametrizaciones físicas en el modelo WRF.

2.3.9. Anidamiento en el modelo WRF

El anidamiento es una técnica que permite generar subdominios de simulación, anidados o dominios hijos dentro del dominio inicial o dominio padre. El objetivo de generar anidados es obtener áreas con un incremento de la resolución horizontal.

La construcción de varios anidados puede ser de manera telescópica (Figura 15 a), es decir, donde cada anidado tiene un solo padre, o también anidados en un solo nivel (Figura 15 b). Sin embargo, hay anidados no permitidos como: cuando dos anidados se superponen (Figura 15 c), o un anidado que provenga de dos dominios padre (Figura 15 d).

El intercambio de información entre un dominio padre y su anidado en la modelización numérica en cada paso de tiempo puede ser de dos maneras:

- Un camino: Solo el dominio padre envía información al anidado durante la modelización.
- Dos caminos: Existe una retroalimentación entre el dominio padre y su anidado durante la modelización.

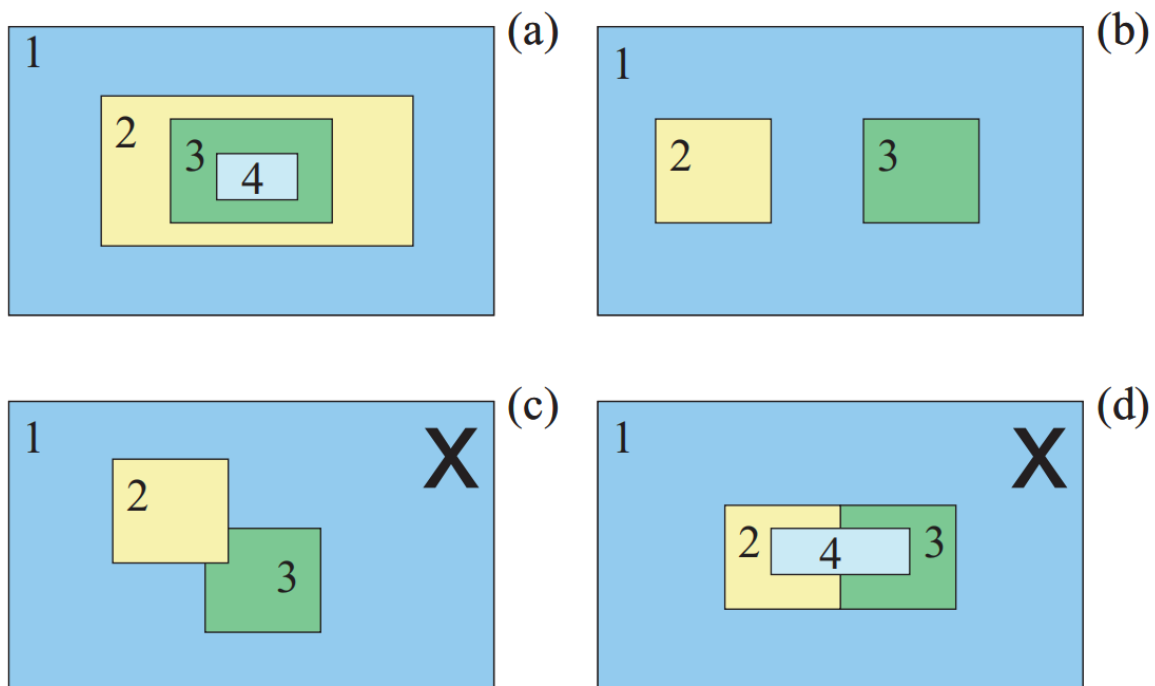


Figura 15. Configuraciones de anidamientos permitidos: (a) Anidado telescópico y (b) Anidado al mismo nivel. Configuraciones no permitidas: (c) Anidados superpuestos y (d) Anidado de dos dominios padre. Fuente: Modificado de Shamarock 2019.

3. METODOLOGÍA

3.1. Esquema general de la generación de escenarios climáticos regionales

La generación de escenarios climáticos regionales incluye diversos pasos que van desde la evaluación y selección de modelos climáticos globales pertenecientes al CMIP, hasta la modelización del área seleccionada (IDEAM, 2010).

El SENAMHI ha desarrollado estudios sobre escenarios de cambio climático desde el 2005 utilizando tanto la reducción de escala dinámica como la estadística paramétrica, así como la aplicación de distintos modelos climáticos regionales.

Los estudios realizados por el SENAMHI abarcan el uso de la reducción de escala tanto a nivel nacional con el uso del modelo climático regional RAMS (SENAMHI, 2009); como a nivel regional para los departamentos de Cusco y Apurímac con el modelo WRF (SENAMHI, 2012), y a escala de cuenca, como el estudio Vulnerabilidad Climática De Los Recursos Hídricos En Las Cuencas De Los Ríos Chillón, Rímac, Lurín Y Parte Alta Del Mantaro (SENAMHI, 2016).

La revisión de los distintos trabajos de SENAMHI, así como de la Guía del IDEAM indican que la generación de datos para escenarios climáticos regionales puede ser dividido en ocho fases (Figura 16). Cabe indicar que para un estudio completo de escenarios climáticos es necesario primero el análisis de la variabilidad climática con datos observados y posteriormente un análisis de la incertidumbre en los resultados (SENAMHI, 2016).

Fase 1: Selección del modelo climático global y escenario de emisión. Esta primera fase realiza la evaluación y selección de un modelo global o un grupo de modelos climáticos globales pertenecientes al CMIP, los cuales deben presentar una buena representación de variables en superficie y en altura, considerando una evaluación de patrones sinópticos, así como de estadísticos principalmente. Además, se debe seleccionar un escenario de emisión que va de acuerdo con el estudio (Barreto y Llacza 2014, SENAMHI 2016).

Fase 2: Implementación del modelo climático regional. La implementación del modelo climático regional, por ejemplo, el modelo WRF, requiere su instalación sobre un sistema computacional con el sistema operativo Linux, así como la instalación de un compilador Fortran y algunas librerías para el manejo de datos en formato GRIB y NetCDF.

Fase 3: Preparación de datos del modelo climático global. Los modelos globales utilizados para la generación de escenarios regionales pertenecen al CMIP. Mayormente los datos de estos modelos no se encuentran en el formato requerido por el modelo WRF, debido a que están en coordenadas distintas a las isobáricas, o no disponen algunas variables directamente, etc.; por lo que es necesario una preparación previa de estos datos antes de ser ingresados en el modelo climático regional.

Fase 4: Configuración del dominio. Esta fase implica la elección del área, la resolución espacial y la proyección cartográfica. Una recomendación para la selección de un área es analizar que los límites del área seleccionada no contengan regiones de gran altitud (SENAMHI, 2016).

Fase 5: Configuración física. Se refiere a la elección del grupo de parametrizaciones físicas para la modelización. Esta es una de las fases más importantes, ya que determina el grupo de parametrizaciones (ecuaciones empíricas) que se utilizarán para la modelización. Arasa et al. (2016), presenta una metodología para obtener una configuración óptima para una determinada región.

Fase 6: Modelización numérica con reanálisis. Esta primera modelización es importante porque permite conocer los errores sistemáticos que pudiera presentar el modelo climático regional para un área específica, y que no dependan de las condiciones iniciales o de contorno, permitiendo entender mejor los resultados de la modelización con los modelos globales del CMIP.

Fase 7: Modelización numérica con un modelo global. La modelización con un modelo global del CMIP se realiza en dos partes. La primera considera la modelización del periodo histórico y la segunda de los datos del periodo futuro.

Fase 8: Postproceso de la modelización. Este proceso permite obtener los resultados de la modelización en rejillas regulares y variables en coordenadas isobáricas.

El proceso de reducción de escala abarca desde la fase 4 hasta la fase 7, considerando la misma explicación para la fase 6 y 7 debido a que implican la modelización numérica, las cuales se describirán a continuación considerando los datos del Estudio de vulnerabilidad climática de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y parte alta del Mantaro realizado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2016).

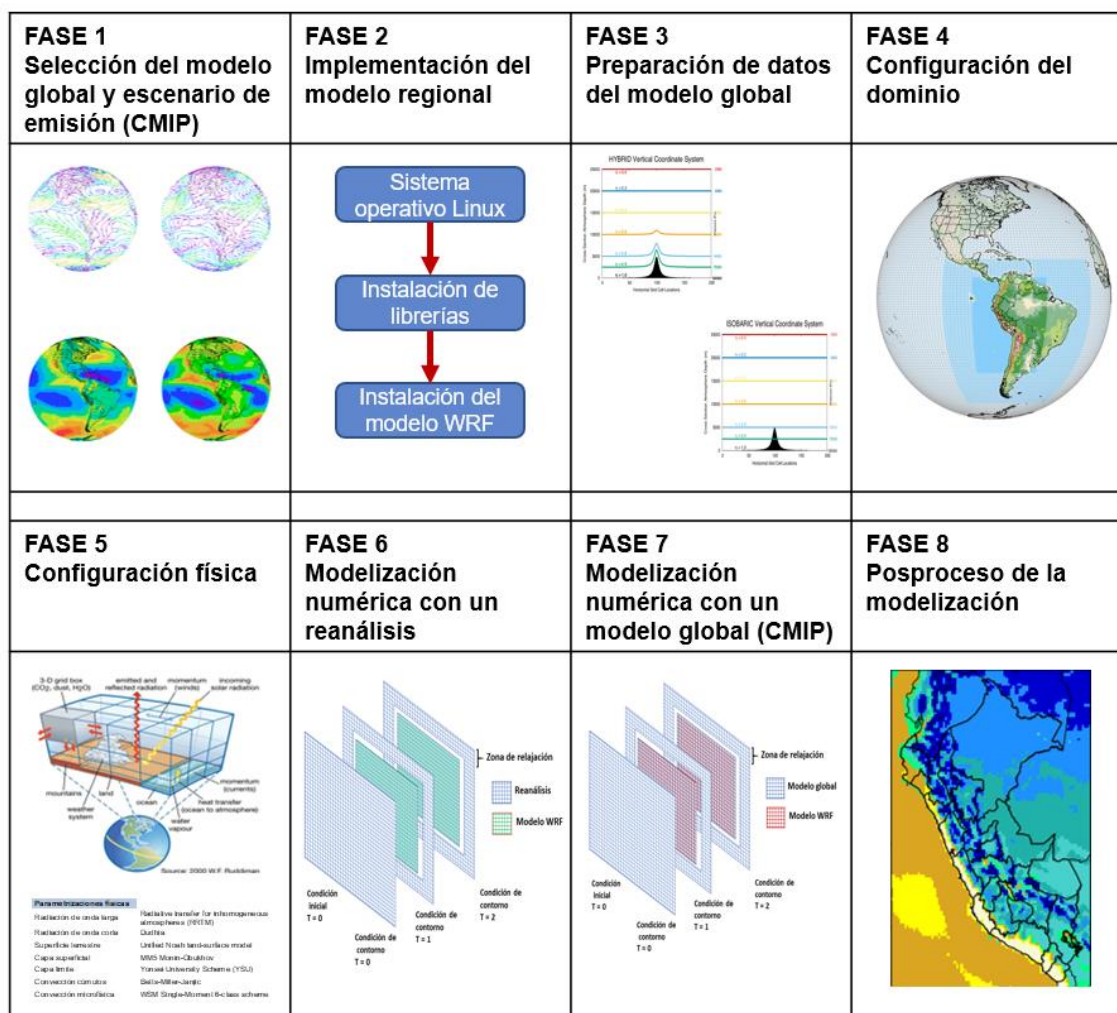


Figura 16. Fases para la generación de escenarios climáticos regionales.

3.2. Datos.

3.2.1. Modelo climático global HadGEM2-ES.

HadGEM2-ES es un modelo climático global que forma parte de la familia HadGEM2 (**H**adley Center **G**lobal **E**nvironmental **M**odel versión 2), con una configuración Earth System (Hardiman et al. 2011). Este modelo global acoplado que comprende una componente atmosférica que comprende 38 niveles verticales híbridos extendiéndose hasta los ~40 km con una resolución horizontal de 1.25° en latitud y 1.875° en longitud conteniendo 192 x 145 grillas, correspondiendo a 208 km x 139 km en el Ecuador reduciendo a 120 km x 139 km en los 55 ° de latitud.

El modelo global HadGEM2-ES (Figura 17), este compuesto por un modelo atmosférico el cual tiene subcomponentes como el esquema de vegetación dinámica TRIFFID y el esquema de biología oceánica diat-HadOCC que permiten la modelización del ciclo de carbono y su interacción con el clima, y UKMA el cual es un modelo utilizado para modelizar la química troposférica como cambios en el metano y ozono y su efecto sobre el forzamiento radiativo; y un modelo oceánico con un esquema biogeoquímico oceánico (BGC) y un modelo de hielo oceánico (sea ice) que interaccionan mediante un acoplador.

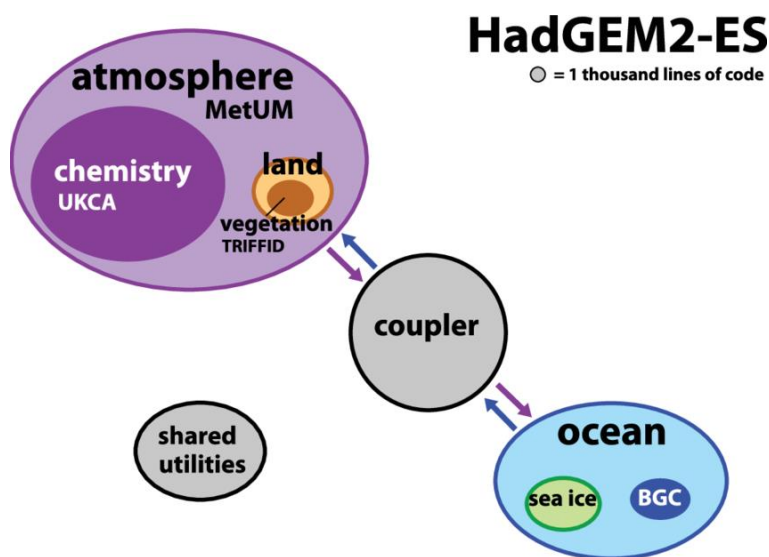


Figura 17. Diagrama de la arquitectura y componentes del modelo HadGEM2-ES. Fuente: Alexander 2015

3.2.2. Base de datos PISCO.

Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO), es una base de datos diaria y mensual espacial de precipitación a una resolución horizontal de rejillas de 0.1° que se extiende sobre Perú (-81.2 a -68.0 de longitud y -18.7 a 0.9 de latitud), iniciando en 1981 hasta la actualidad (Aybar, 2019), siendo la versión actual la 2.1.

PISCO ha sido construido mediante la fusión de datos observados (945 estaciones, Figura 18) de precipitación con control de calidad y completos y datos del Climate Hazards Group Infrared Precipitation (CHIRP), mediante técnicas geoestadísticas como Residual inverse distance weighting (RIDW) para PISCO diario y Residual ordinary kriging (ROK).

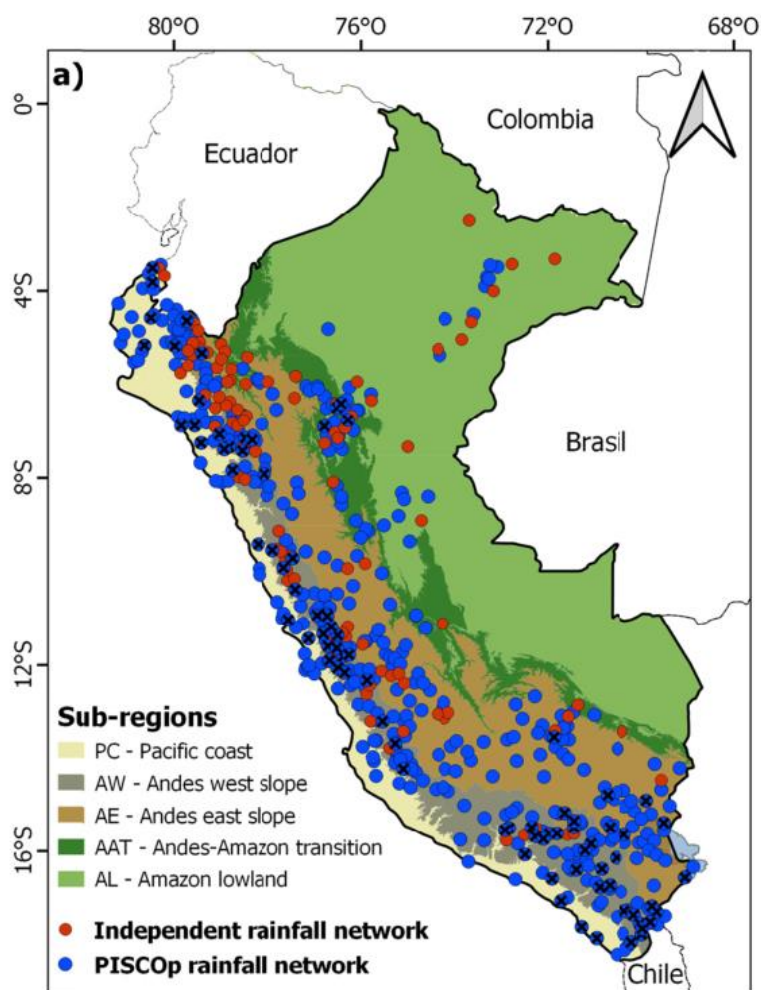


Figura 18. Distribución de estaciones utilizadas en la construcción de PISCO (círculo azul) y su evaluación (círculo rojo).
Fuente: Aybar et al. 2015.

3.3. Configuración de la reducción de escala dinámica

3.3.1. Configuración del dominio de la reducción de escala

Se trabajan dos dominios: el primer dominio a 48 x 48 km para Suramérica, y un dominio anidado para Perú de 16 x 16 km con el modelo WRF (Figura 19). La proyección utilizada es Mercator, la proyección recomendada para zonas tropicales. La resolución del modelo global HadGEM2-ES es variable en latitud, siendo cerca al Ecuador aproximadamente de 139 x 208 km.

El dominio de Suramérica se encuentra entre las longitudes de -100 a -20° W con 175 rejillas, y entre las latitudes de -52° S a 18° N con 200 rejillas.

El dominio anidado de Perú para la reducción de escala dinámica abarca la región entre longitudes de -90 a -54.59° W y latitudes entre -33.738° S a 8° N.

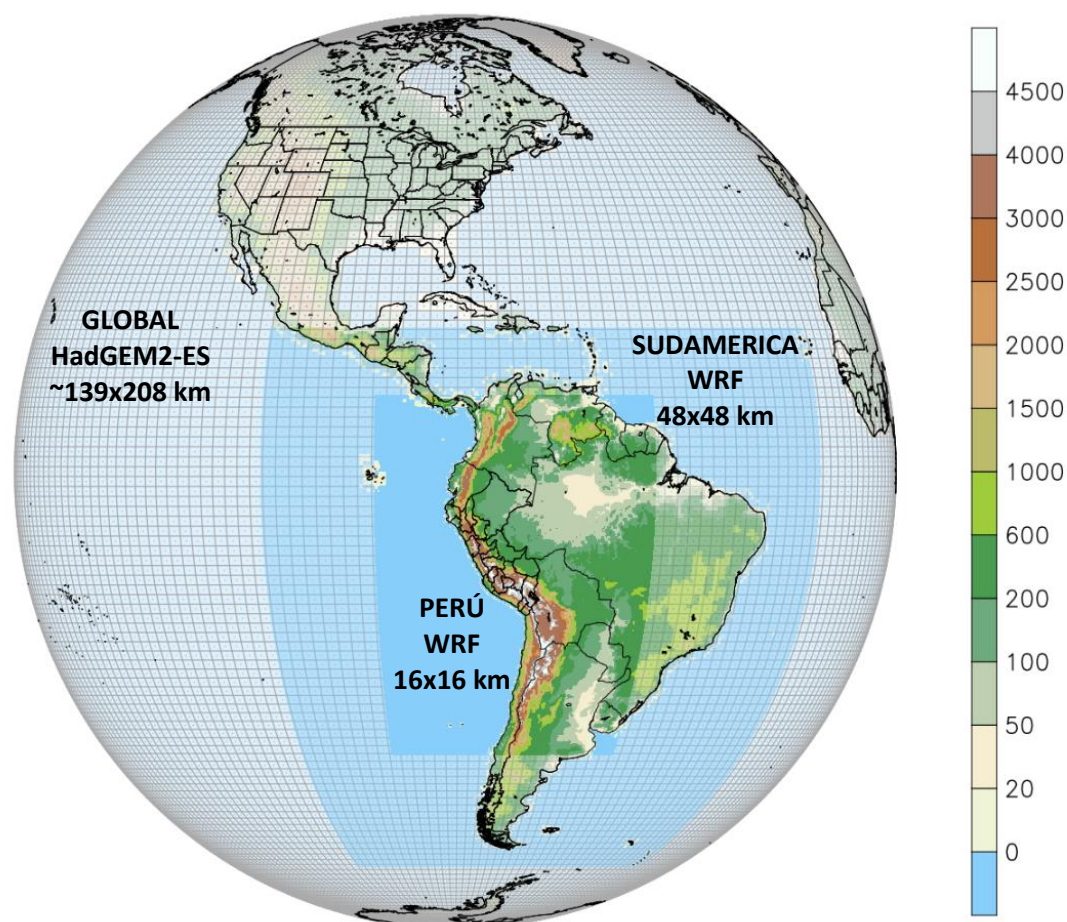


Figura 19. Dominios utilizados en la reducción de escala dinámica y su resolución espacial: Suramérica 48x48 km y su anidado de Perú 16x16 km. En colores la topografía [m].

3.3.2. Configuración de las parametrizaciones físicas

El conjunto de parametrizaciones físicas utilizadas se basó en el estudio de Jacome (2012), el cual realizó un estudio sobre la región Cusco evaluando distintas configuraciones de la microfísica y cúmulos para una mejor representación de la precipitación (Tabla 3).

Las parametrizaciones para la radiación atmosférica varían de acuerdo con las longitudes de onda, esto es debido a la fuente de donde provienen, siendo las provenientes del Sol mayormente en radiación de onda corta y la superficie de la tierra y la atmosfera en radiación de onda larga de acuerdo con su temperatura (Ley de Wein). Estas se describen a continuación:

Esquema de radiación de onda larga: Se utilizó el *Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres* (RRTM), el cual es un esquema de 16 bandas espectrales que utiliza el método de correlación-k que permite el cálculo acelerado de flujos y tasas de enfriamiento para una atmosfera homogénea. Utiliza tablas preestablecidas para representar los procesos de onda larga debido al vapor de agua, ozono, CO₂ y traza de gases, y la cuantificación de la profundidad óptica de la nube (Mlawer 1997).

Esquema de radiación de onda corta: Se utilizó el esquema de *Dudhia*, que considera la integración del flujo solar teniendo en cuenta la dispersión en cielo claro, así como la absorción del vapor de agua y albedo. Utiliza tablas para las nubes uniformemente claras o cubiertas, además este esquema no incluye ozono (Dudhia 1989).

Con respecto a las parametrizaciones que desarrolla la interacción suelo atmosfera, la cual permite el pronóstico de la temperatura superficial, y permite los intercambios de flujo de calor, de humedad y de momento, así como los efectos de fricción debido al tipo de superficies se describen a continuación:

Esquema del modelo de superficie de suelo: Se utiliza el *Unified Noah land-surface model*, esquema desarrollado por NCAR y NCEP. Es un modelo de 4 capas para la temperatura y humedad del suelo que permite predecir agua almacenada en

el dosel y en la capa de nieve almacenada en la tierra, y considera los espesores de 10, 30, 60 y 100 cm. El cálculo de la temperatura superficial utiliza un modelo termodinámico que resuelve una ecuación de balance de energía superficial linealizada. Este esquema permite trabajar los procesos de evapotranspiración, drenaje del suelo y escorrentía teniendo en cuenta las categorías de vegetación y de textura de suelo que se consideran como variables primarias y a partir de estas se obtienen otras como la mínima resistencia del dosel, y propiedades hidráulicas del suelo entre otras, además provee flujos de calor latente y sensible para el esquema de la capa límite, así como el hielo en el suelo y los efectos de la cobertura fraccional de nieve el cual posee una sola capa (Tewari 2004).

Esquema de capa superficial: Se utiliza el esquema de *MM5 Monin-Obukhov*, el cual utiliza funciones de estabilidad para calcular los coeficientes de intercambio en superficie para el calor, humedad y momento. Utiliza una relación entre la velocidad de fricción y la longitud de rugosidad (relación de Charnock) sobre el agua y considera 4 regímenes de estabilidad. Este esquema debe ser utilizado junto con los esquemas MRF y YSU de capa límite (Beljaars 1994).

A continuación, se describe el esquema utilizado en los de la Capa límite planetaria, la cual es la capa inferior de la troposfera que está en contacto con la superficie de la Tierra, la cual suele ser turbulenta y estar cubierta por una capa estática estable de aire o de inversión de temperatura, la cual se describe a continuación:

Esquema de capa límite: Se utiliza el *Yonsei University Scheme* (YSU), el cual utiliza términos de contra gradiente para representar los flujos debido a gradientes no locales. El arrastre se hace proporcional al flujo de flotabilidad de la superficie. La parte superior de la capa límite se define mediante un número crítico de Richardson a granel de cero, definiéndose como la capa de arrastre máximo en comparación con la capa en la difusividad se vuelve cero. También dispone de efectos de arrastre topográfico que modifican el modelo de arrastre según la variación de cada rejilla en la elevación del terreno. Así como el proceso de mezcla entre arriba-debajo de la radiación que interviene en procesos de nubes estratocúmulos y neblina (Hong et al. 2006).

Finalmente se describe las parametrizaciones que permiten los procesos para el cálculo de la precipitación en sus diferentes fases la cual considera dos procesos principales los cuales son la convección cúmulos (responsable de los efectos a escala de subrejilla de las nubes convectivas y poco profundas, y los flujos verticales debido a corrientes ascendentes y descendentes no resueltas), y la microfísica (procesos de vapor de agua, nubes y precipitación explícitamente resueltos), las cuales se describen a continuación:

Esquema de convección cúmulos: Se utiliza el esquema *Betts-Miller-Janjic*, que considera que los perfiles de humedad y el tiempo de relajación (tiempo donde el ajuste convectivo responde al forzante de gran escala) para la convección profunda son variables y dependen de un parámetro denominado “eficiencia de la nube”, el cual depende del cambio de la entropía y la precipitación en cada paso de tiempo y de la temperatura media de la nube (Janjic et al. 1994). Además, para procesos de convección poco profunda el perfil de humedad es definida en base a la entropía, valores pequeños y no negativa.

Esquema de microfísica: Se utiliza el esquema *WRF Single-Moment 6-class Scheme* (WSM6), el cual permite el cálculo de vapor de agua, lluvia, nieve, hielo de nube, agua de nube y granizo. Considera una única velocidad de caída de partículas de fase mixta (nieve-granizo). Todos los esquemas WMS calculan radios efectivos para que el hielo, la nieve y el agua de las nubes interactúen con el esquema de parametrización de radiación (Hong y Lim 2006).

Tabla 3. Configuración física utilizada en la reducción de escala dinámica

Parametrizaciones físicas	
Radiación de onda larga	<i>Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres (RRTM)</i>
Radiación de onda corta	Dudhia
Modelo de superficie de suelo	<i>Unified Noah land-surface model</i>
Capa superficial	MM5 Monin-Obukhov
Capa limite	<i>Yonsei University Scheme (YSU)</i>
Convección cúmulos	Betts-Miller-Janjic
Convección microfísica	<i>WRF Single-Moment 6-class scheme</i>

3.3. Modelización numérica

Las condiciones iniciales y de contorno, incluyen variables atmosféricas y de suelo (Tabla 2), y la temperatura superficial del mar, obtenidas del modelo climático global HadGEM2-ES, el cual tiene una resolución horizontal aproximada de 1.25° de latitud por 1.875° de longitud para el periodo de 1981 – 2005, perteneciente al experimento HISTORICAL (que incluye concentraciones de gases de efecto invernadero observadas) y el periodo 2006 – 2065 correspondiente al experimento RCP 8.5 (que incluye escenarios de emisión y concentración de gases de efecto invernadero). Las variables geográficas incluidas en el modelo WRF forman también parte de las condiciones de contorno.

La modelización numérica fue desarrollado en servidores del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), y consideró dos dominios: Suramérica a 48 km y su anidado de Perú a 16 km, siendo el anidamiento de dos caminos, es decir, hubo una retroalimentación entre el dominio de Suramérica y de Perú en cada paso de la modelización, además se utilizó el núcleo dinámico no hidrostático del modelo WRF, la cual resuelve la ecuación de movimiento vertical completa sin considerar la aproximación hidrostática (que indica que las aceleraciones verticales son despreciables respecto a la aceleración de la gravedad, considerándose un movimiento netamente horizontal).

El proceso de modelización de ambos periodos, 1981-2005 y 2006-2065, se realizó con una re-inicialización cada seis años, considerando el primer año como tiempo de estabilización o spin-up, los cuales no se consideran dentro de los resultados. Es así como se indica en la Figura 20, los años validos del periodo 1981-2005 (en verde) y los años válidos para el periodo futuro 2006-2065 (en anaranjado).

Así mismo, se considero un paso de tiempo de 3 minutos para actualizar las ecuaciones, y una actualización del esquema de radiación cada 30 minutos. Esto permitió mantener el criterio de estabilidad de la condición de *Courant-Friedricks-Lewy* (CFL), que considera que el paso de tiempo (Δt) utilizado debe ser mas pequeño que la longitud de la rejilla (Δx) dividida por la velocidad (V_{atm}) del movimiento atmosférico más rápido posible en el modelo (una parcela de aire no puede moverse más que en una rejilla durante un paso de tiempo), bajo la discretización de diferencias finitas como indica la siguiente ecuación:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V_{atm}}$$

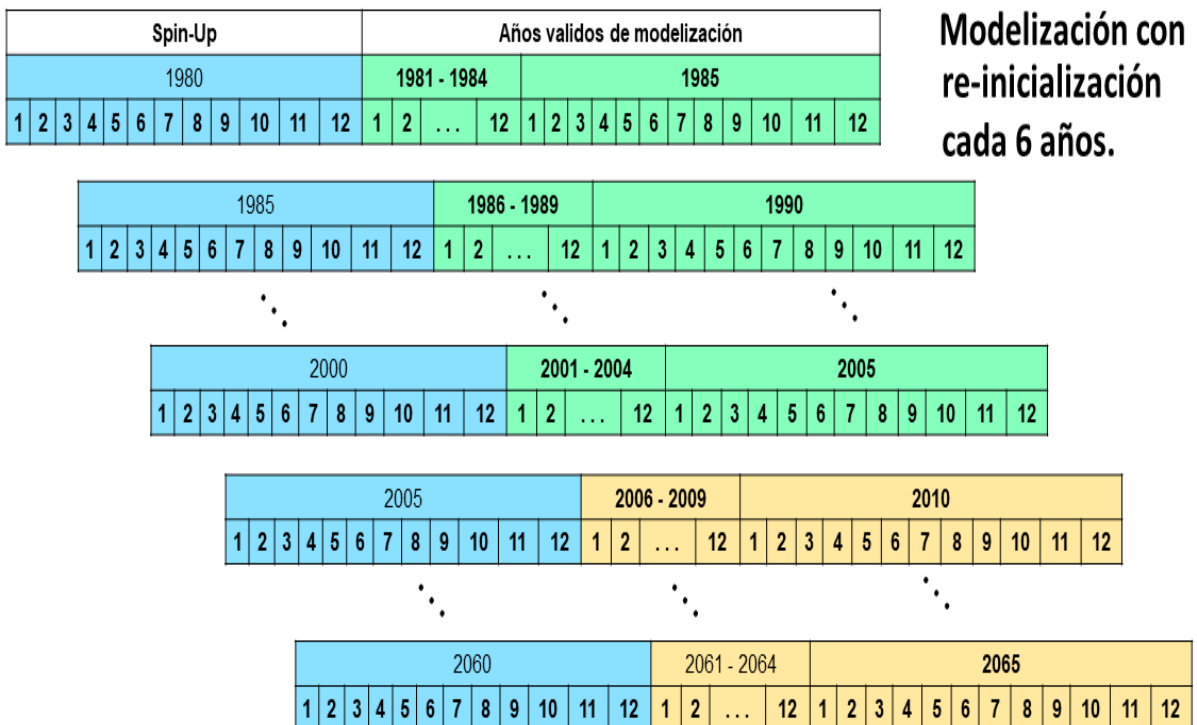


Figura 20. Proceso de modelización con re-inicialización cada 6 años con el modelo WRF.

3.4. Resultados

3.4.1. Topografía

La Figura 21, presenta la topografía, condición de contorno en la modelización numérica, del modelo climático global HadGEM2-ES (> 100 km) y las utilizadas en las modelizaciones de 48 y 16 km, las cuales fueron interpoladas desde la data de topografía GTOPO3 a 1km que está incluida en la base de datos geográficos del modelo WRF.

La distribución espacial de la topografía utilizada por el modelo HadGEM2-ES muestra una subestimación llegando a valores menores a 4500 m (Figura 21 a), además se observa rejillas con valores mayores a 200 sobre el océano, y rejillas con topografía cero sobre la selva.

La distribución espacial de la topografía para la modelización a 48 km presenta una mejora en la representación de la topografía sobre Perú, sin embargo, todavía presenta valores de topografía mayores a cero sobre el océano frente a la zona costera (Figura 21 b). Disminuyendo estas áreas con la topografía a 16 km (Figura 21 c).

Adicionalmente se realizó un corte de la topografía en -12°S y el rango de longitud de -82 a 68°W (Figura 21 d). En la cual se observa que los Andes en los datos del HadGEM2-Es con un pico entre 2500 a 3000 m. La topografía a 48 km mejora la representación ya que permite observar los distintos picos que existen sobre la cordillera de los Andes, además de la presencia de valles, siendo más notorio es a 16 km.

Una mejor representación en la topografía debiera permitir una mejor representación de mecanismos como la circulación valle – montaña, así como la precipitación orográfica, lo que indica que una mejor representación de las condiciones de contorno contribuye a una mejor representación de la modelización.

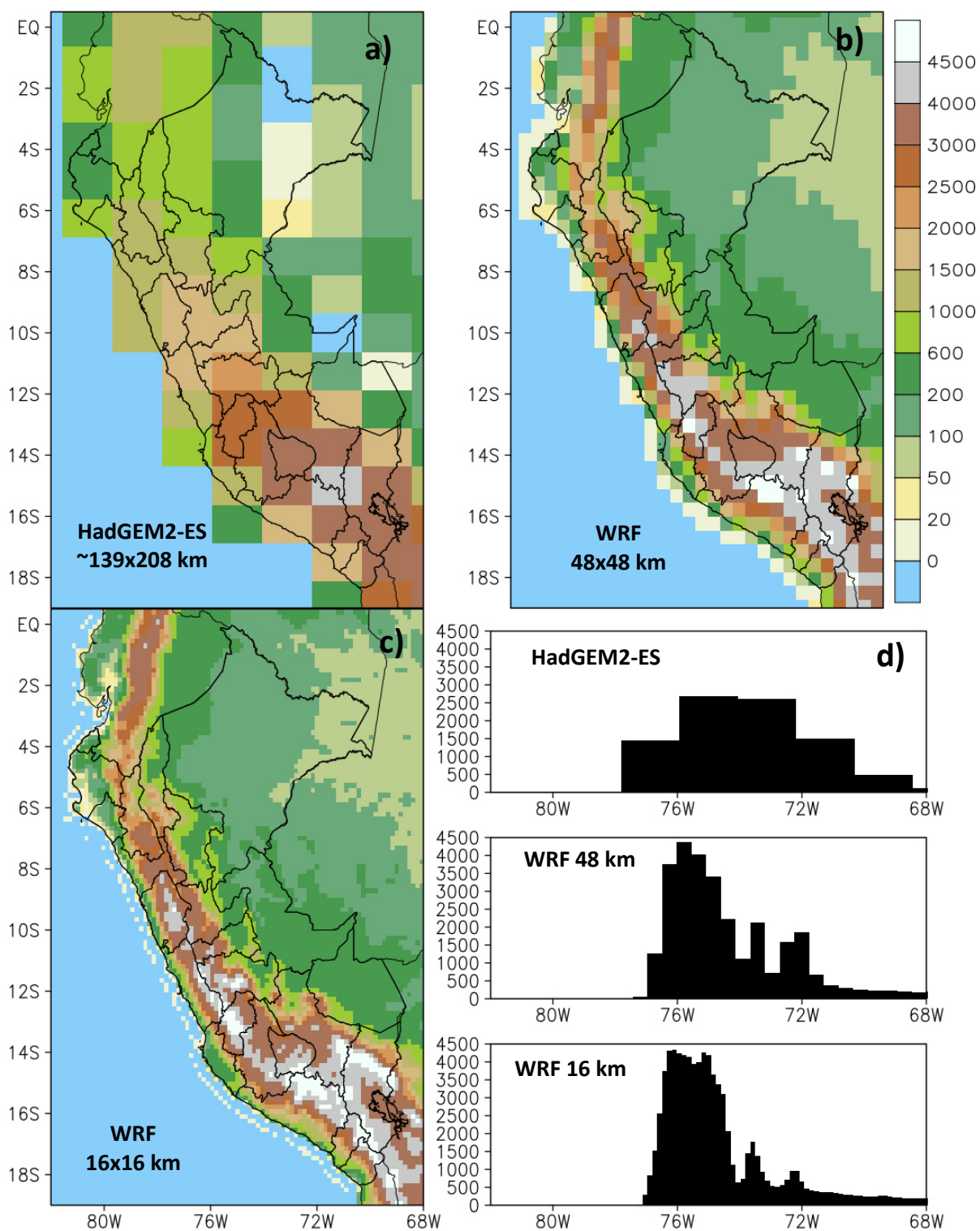


Figura 21. Topografía [metros], a) en el modelo global HadGEM2-ES, b) en la reducción de escala a 48 km y c) en la reducción de escala a 16 km, d) Perfil de la topografía en la latitud 12 S.

3.4.2. Distribución espacial de la precipitación

La Figura 22 presenta la distribución espacial del acumulado trimestral de la precipitación [mm] sobre Perú para el promedio del periodo de 1981-2005, correspondiente al experimento *HISTORICAL*, desde el modelo global HadGEM2-ES, el resultado de la reducción de escala a 48 y 16 km, y los datos de *Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations* (PISCO) (Aybar, 2019), los cuales se considera la información de referencia al ser una base de datos observadas en rejillas a 10 km.

La evaluación de la distribución espacial de la precipitación para el periodo 1981-2005, permitirá conocer la existencia de posibles errores sistemáticos, así como identificar las zonas de mayor y menor confianza en los resultados de la modelización.

En verano se observan los mayores acumulados de precipitación con respecto a los otros trimestres. Se observa en PISCO que los mayores valores de precipitación se ubican en la parte oriental de la cordillera de los Andes (Andes central y sur de Perú), y los menores sobre la franja costera. El modelo global HadGEM2-ES debido a su gruesa resolución espacial no describe la distribución espacial dada por PISCO presentando además sobrestimación de la precipitación en la mayor parte de Perú excepto selva norte. Los datos de la reducción de escala a 48 km presentan una mejor distribución de precipitación, sin embargo, sobrestiman los valores de precipitación en todo el Perú. La mejor representación de la precipitación respecto a PISCO es dada por los datos de la reducción de escala a 16 km, aunque presenta una ligera sobrestimación sobre los Andes y selva norte. Se observa, además, una franja de precipitación sobre el lado occidental de la cordillera de los Andes la cual no es observado con los datos de PISCO.

Para otoño hay un aumento de la precipitación sobre la selva norte respecto a verano y disminuye la precipitación sobre el lado oriental de la cordillera de los Andes. A pesar de su resolución espacial el modelo HadGEM2-ES presenta una distribución similar a PISCO, aunque con sobrestimaciones. Mientras los datos a 48

km también presentan una distribución similar a PISCO, pero con menor sobrestimación sobre sierra y selva sur. Los datos a 16 km son los que presentan mayor similitud a la distribución de precipitación de PISCO, aunque con una leve subestimación en selva norte, se observa una franja de precipitación al lado occidental de la cordillera similar a verano.

Invierno es el trimestre con menores acumulados de precipitación sobre Perú. El modelo HadGEM2-ES no describe la distribución espacial dada por PISCO y presenta sobrestimación en todo el Perú. La reducción de escala a 48 km presenta una mejora en la distribución de la precipitación, pero presenta sobrestimaciones especialmente sobre la costa norte y selva central. Mientras los datos a 16 km son los más cercanos al observado PISCO, aunque todavía mantiene una leve sobrestimación en costa norte y sierra sur. De similar manera a los trimestres anteriores se observa una franja de precipitación sobre el lado occidental de la cordillera, aunque de menor magnitud.

El trimestre de primavera presenta una distribución de precipitación homogénea para la mayor parte de Perú en el rango de 200 a 400 mm/trimestre, con los mayores valores de precipitación sobre la parte oriental de la cordillera central y sur de los Andes peruanos y una zona costera con valores menores a 10 mm/trimestre. Este trimestre presenta las mayores áreas con sobrestimación tanto del modelo global HadGEM2-ES como de los datos a 48 km, de similar manera ambos no describen una distribución similar a lo observado. Los datos a 16 km presentan una similar distribución de precipitación respecto a PISCO, pero con sobrestimaciones sobre la cordillera de los Andes y selva norte. Para este trimestre se observa también la franja de precipitación sobre el lado occidental de la cordillera de los Andes, lo cual indicaría que esta franja sería un error sistemático del modelo WRF.

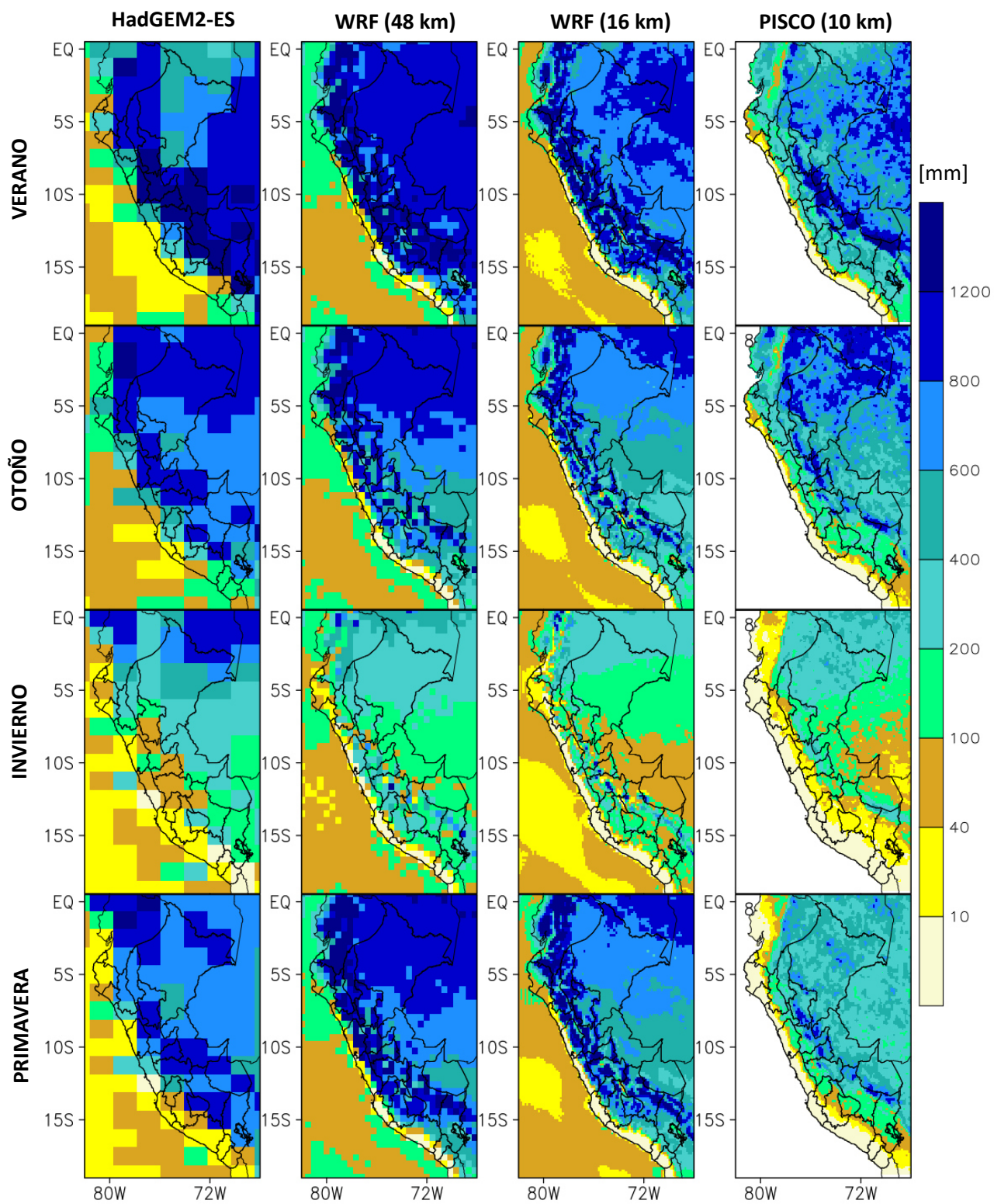


Figura 22. Distribución espacial de los acumulados de la precipitación trimestral [mm] sobre Perú para el periodo 1981 – 2005.

3.4.3. Ciclo anual de la precipitación

La Figura 23 representa la distribución espacial del coeficiente de correlación de Pearson del ciclo anual de la precipitación de los datos promedios mensuales para el periodo de 1981-2005, entre los datos del modelo global HadGEM2-ES, y sus reducciones de escala a 48 km y 16 km sobre Perú, respecto a la base de datos PISCO. Para poder realizar la comparación del modelo global y las reducciones de escala con datos de PISCO se realizó primero una interpolación mediante la técnica de vecino más cercano a la resolución espacial de PISCO, para tener el mínimo de pérdida de información debido a la interpolación.

La evaluación directa sobre el modelo global HadGEM2-ES del ciclo anual indica coeficientes de correlación positivos sobre la mayor parte de Perú con valores superiores a 0.5, excepto sobre la costa centro y sur, los Andes sur occidental y sobre el norte de Loreto que presentan valores menores a 0.5 e incluso valores negativos.

Luego de realizado la reducción de escala dinámica del modelo global se observa una mejora en los valores de coeficiente de correlación sobre la costa central y sur y el norte del departamento de Loreto, principalmente en la resolución espacial horizontal de 16 km. Por otro lado, se observa una leve disminución de los valores del coeficiente de correlación sobre la costa norte.

El análisis de los cortes transversales sobre tres distintas latitudes en el mapa del coeficiente de correlación nos permite ver en mayor detalle la mejora, disminución o permanencia de este coeficiente, y esto a su vez nos indica si hay cambios en la representación del ciclo anual. Es así como en la latitud 4°S se observa una leve disminución de 0.8 a 0.4 en la costa norte (81 a 80° W) y una mejora de 0.2 hasta 0.8 en el norte de Loreto (74 a 72° W), permaneciendo casi sin cambios en el resto de las longitudes. Y en la latitud de 16° S donde se observa mejoras de valores negativos hasta valores de 0.4 a 0.8 (74 a 72° W) sobre la costa sur. La disminución de valores en 69°W corresponde a la ubicación sobre el lago Titicaca.

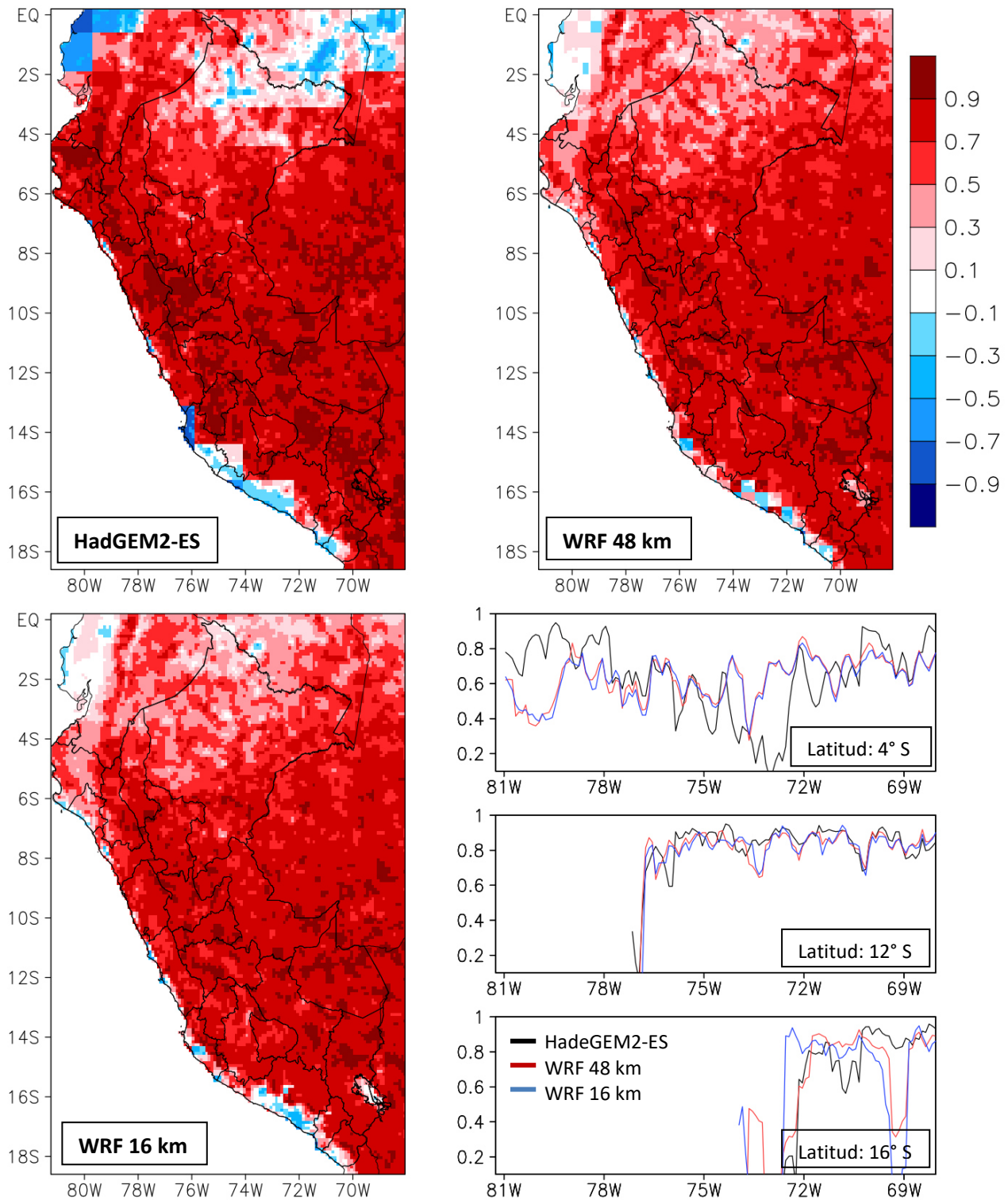


Figura 23. Coeficiente de correlación del ciclo anual de la precipitación para 1981 al 2005 sobre Perú.

3.4.4. Precisión estadística de la reducción de escala

La precisión estadística de la reducción de escala es la medida del grado de correspondencia entre los datos modelizados y los datos que se utilizan como observación o referencia. Para esto se calculó el error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo o BIAS, sobre los datos mensuales de la reducción de escala a 48 y 16 km del modelo HadGEM2-ES respecto a los datos de referencia de PISCO en el periodo de 1981 al 2005.

El RMSE es una medida de las diferencias en promedio de la reducción de escala y los datos de referencia de PISCO, estos se presentan en las magnitudes en la Figura 24, mientras el BIAS es una medida de la medida de la tendencia a subestimar o sobrestimar los resultados de la reducción de escala a los datos de referencia, los cuales se indican con el signo en la Figura 24. Este análisis se realiza para cada uno de los 4 trimestres, donde a los datos mensuales se les dividió por el número de días por mes para obtener la precipitación en mm/día.

Para el modelo global HadGEM2-ES (primera columna en la Figura 24), se observa sobrestimación sobre los Andes y Costa, y subestimación sobre el departamento de Loreto, siendo los mayores errores sobre los Andes con valores hasta de 10 mm/día, excepto en invierno.

La reducción de escala a 48 km presenta también sobrestimaciones sobre Perú, excepto en invierno donde presenta subestimaciones sobre la selva. Los mayores errores se presentan en primavera con valores que superan los 10 mm/día para los Andes y selva. No se aprecia reducciones apreciables de RMSE respecto a los datos directos del modelo global HadGEM2-ES.

Mientras que, en la reducción de escala a 16 km, aunque se mantiene la sobrestimación sobre los Andes se observa una reducción de los errores principalmente sobre los Andes sur (Ayacucho, Arequipa, Cusco, Moquegua, Tacna y Puno), por otro lado, los mayores errores se presentan en la parte occidental de los Andes. También se presenta una reducción de los errores sobre la selva, principalmente para el trimestre de primavera.

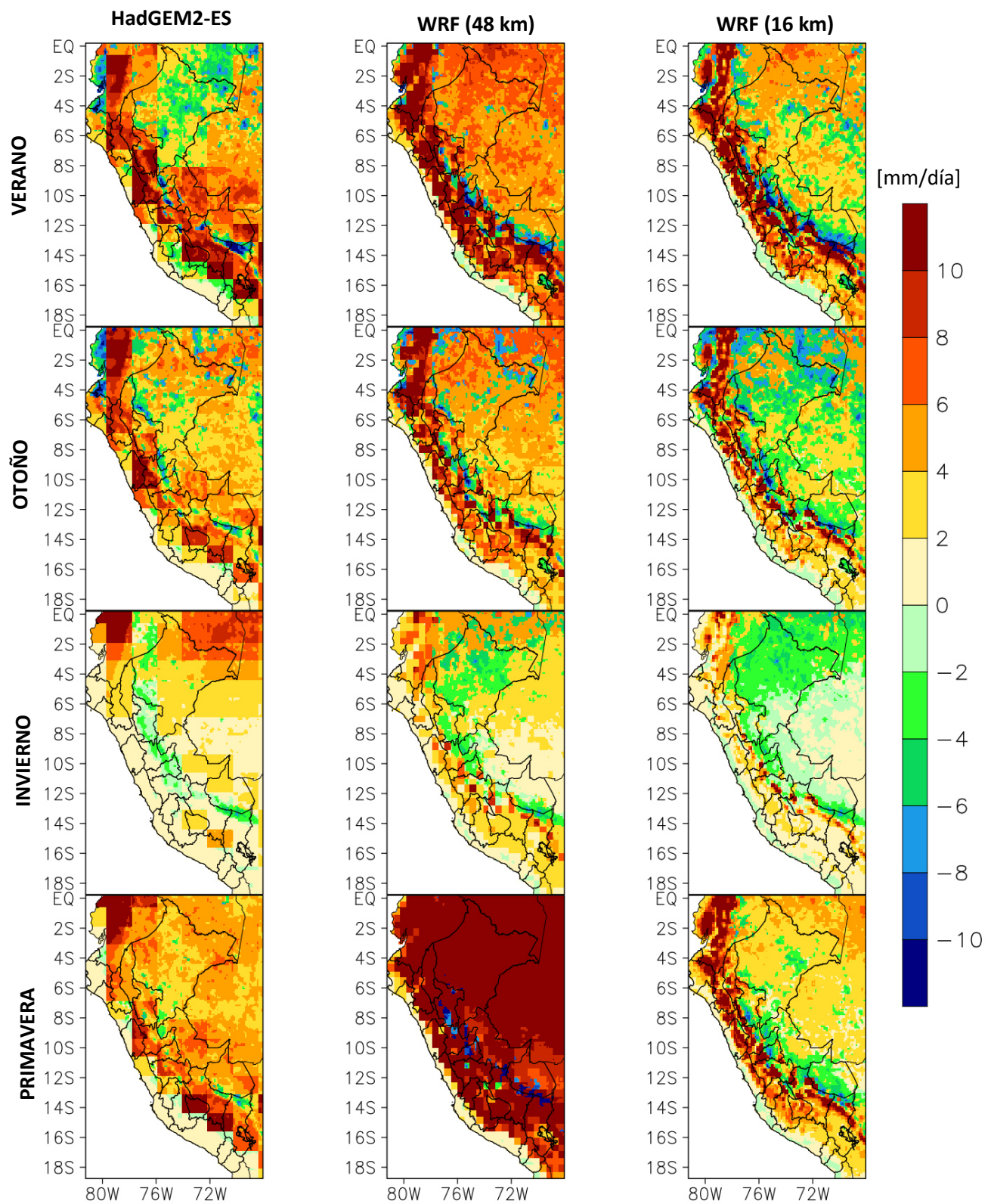


Figura 24. Distribución espacial de RMSE (magnitud) y BIAS (signo) para 1981 al 2005 sobre Perú.

3.4.5. Distribución espacial de cambios en la precipitación al 2050

La reducción de escala del modelo global HadGEM2-ES utilizando el modelo climático regional WRF, permitió obtener información de precipitación a una resolución espacial de 16 km para el dominio de Perú, en un periodo histórico de 1981-2005 y un periodo futuro de 2006 al 2065, lo cual representa los escenarios climáticos regionales o escenarios climáticos a escala regional.

El principal análisis que se realiza con los datos de los escenarios climáticos regionales es el cálculo de los posibles cambios de una variable, como precipitación, entre el promedio multianual del periodo futuro (2036-2065) y el promedio multianual periodo histórico o periodo de referencia (1981-2005), el cual debe ser de 30 años, sin embargo, en la presente monografía debido a la información disponible el periodo de referencia se considera de 25 años.

A continuación, se presenta las ecuaciones utilizadas para el cálculo del cambio porcentual de la precipitación para el periodo 2036-2065, centrado al 2050, respecto al periodo de referencia 1981-2005.

$$\text{Cambio } PR_i = \left(\frac{\overline{PR}_i \text{ prom } 2036-2065 - \overline{PR}_i \text{ prom } 1981-2005}{\overline{PR}_i \text{ prom } 1981-2005} \right) \times 100\% \quad \text{..... (6)}$$

Donde:

$\text{Cambio } PR_i$	Cambio porcentual de la precipitación al 2050.
$\overline{PR}_i \text{ prom } 2036-2065$	Promedio multianual de la precipitación futura.
$\overline{PR}_i \text{ prom } 1981-2005$	Promedio multianual del periodo de referencia.
i	Para cada trimestre Verano: Diciembre-enero-febrero. Otoño: Marzo-abril-mayo. Invierno: Junio-julio-agosto. Primavera: Setiembre-octubre-noviembre.

Asimismo, se utilizó la prueba de t-Student para determinar si el cambio de la precipitación respecto a los dos promedios multianuales por cada trimestre es significativa (Decremer et al., 2014). La ecuación 7 presenta el cálculo del parámetro t para cada rejilla, el cual fue comparado con los valores de las tablas considerando

un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, que indica que existe un 5% de posibilidad de que las áreas consideradas con cambios significativos no lo sean en realidad.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

\bar{x}_1 : promedio multianual de la precipitación por cada trimestre para 1981-2005.

\bar{x}_2 : promedio multianual de la precipitación por cada trimestre para 2036-2065.

s_1 : Desviación estándar de cada serie trimestral de precipitación de 1981-2005.

s_2 : Desviación estándar de cada serie trimestral de precipitación de 2036-2065.

n_1 : Número de años de cada serie trimestral de precipitación de 1981-2005.

n_2 : Número de años de cada serie trimestral de precipitación de 2036-2065.

La Figura 21, presenta la distribución espacial de los cambios porcentuales de precipitación [%] para los cuatro trimestres para 2036-2065 (cambios centrados al 2050). Las áreas con puntos negros indican áreas con cambios significativos al nivel de significancia de 0.05.

En verano, trimestre con mayor precipitación en Perú, los incrementos significativos se encontrarían sobre Apurímac, Cusco y Puno; y las reducciones significativas sobre San Martín, Huánuco y Pasco principalmente. Otoño presenta una distribución espacial similar a verano excepto en Loreto, sin embargo, los cambios significativos son en los mismos departamentos.

En invierno, trimestre con menor precipitación sobre Perú, se presentarían los mayores incrementos sobre Perú, siendo significativos sobre Loreto y norte de Puno. Mientras en primavera se presentarían las mayores reducciones, siendo significativas sobre Loreto, San Martín y Amazonas principalmente. Sobre este mismo trimestre se presentaría también un incremento significativo sobre el sur de Cusco y norte de Puno.

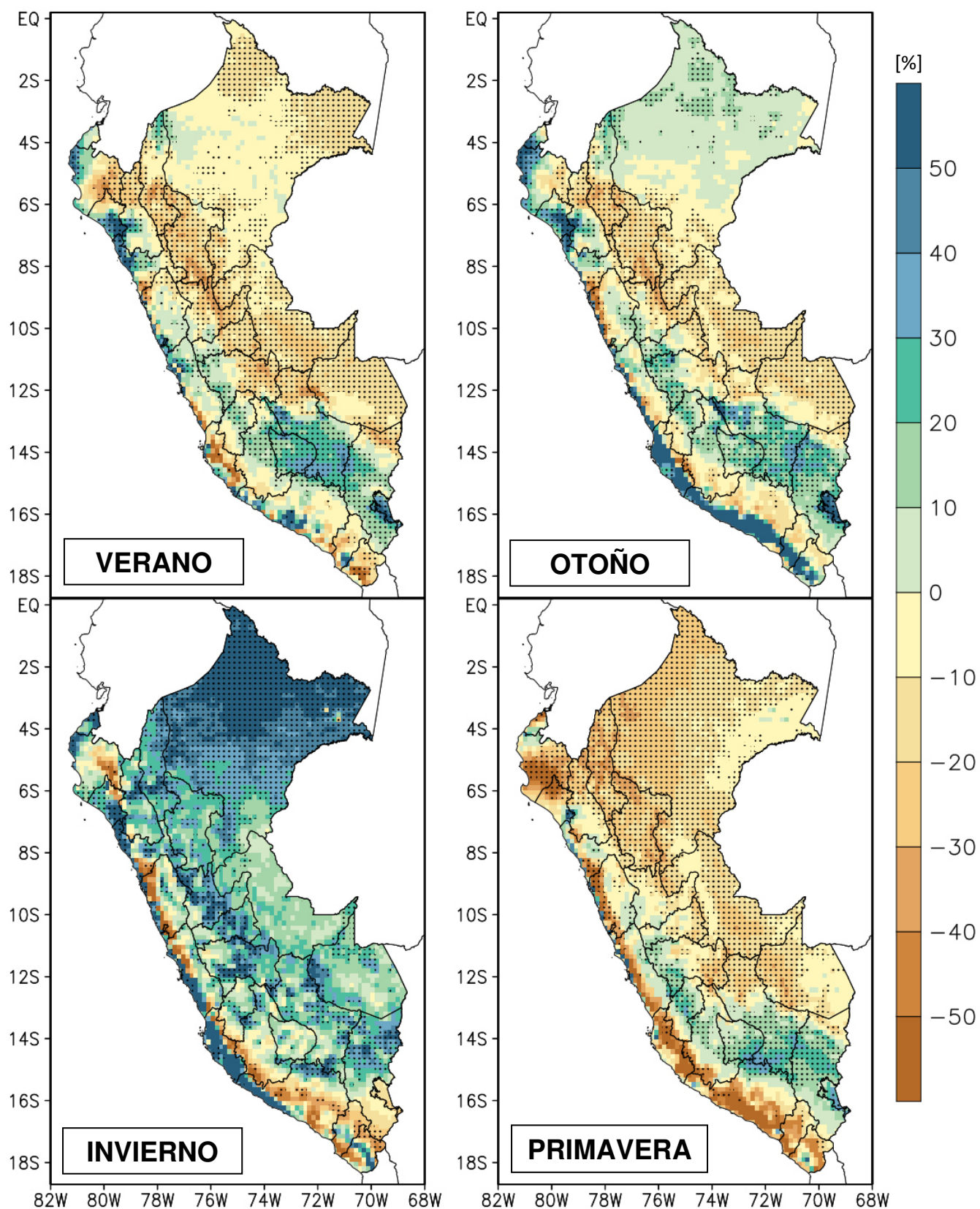


Figura 25. Distribución espacial de cambios en la precipitación trimestral [mm] para el periodo 2036-2065 respecto al periodo de referencia 1981-2005.

4. CONCLUSIONES

Del desarrollo del presente trabajo se puede concluir lo siguiente:

- La reducción de escala o regionalización dinámica es un método que permite obtener información meteorológica en superficie y en altura (tridimensional) con un incremento en la resolución espacial mediante un modelo climático regional.
- El modelo climático regional WRF, es una herramienta que ha sido utilizada en el Perú en distintas aplicaciones como predicción numérica de gases y partículas contaminantes, predicción numérica estacional y escenarios climáticos regionales.
- La reducción de escala de precipitación a 16x16 km para el periodo histórico de 1981-2005 mejora la representación espacial y temporal del modelo global HadGEM2-ES para cada uno de los cuatro trimestres, con las mayores precipitaciones en verano y las menores sobre invierno. Se observa además un error sistemático que produce exceso de precipitación sobre el lado este de la cordillera de los Andes.
- Los cambios de precipitación para el promedio multianual 2036-2065 respecto al promedio del periodo de referencia 1981-2005, presentan los mayores incrementos en invierno y las mayores reducciones en primavera. La distribución de los cambios significativos varía en cada trimestre, siendo mayormente localizados sobre el lado este de la cordillera de los Andes.

5. REFERENCIAS

- Alexander, K., Easterbrook, S. M. (2015). The software architecture of climate models: a graphical comparison of CMIP5 and EMICAR5 configurations. *Geosci. Model Dev.*
- Arasa, R., Porras, I., Domingo-Dalmau, A., Picanyol, M., Codina, B., González, M.Á. y Piñón, J. (2016) *Defining a Standard Methodology to Obtain Optimum WRF Configuration for Operational Forecast: Application over the Port of Huelva (Southern Spain)*. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6, 329-350. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62028>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). *Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day*. *Hydrological Sciences Journal*. 65(5), 1-16 - April 2020. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Barreto, C. y Llacza A. (2014). Validation of CMIP5 models by means of representing patterns of mesoscale systems on South America for the summer and Winter. Poster presentado en WCRP VAMOS/CORDEX Workshop on Latin-America and Caribbean CORDEX LAC: Phase II - The Caribbean. Recuperado el 10 de octubre de http://www.cima.fcen.uba.ar/cordex2/final/Poster_Barreto.pdf
- Beljaars, A.C.M., 1994: The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121, 255–270.
- Charron, I. (2016). *A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions*, 2016 Edition. Ouranos, 94p.
- Decremer, D., Chung, C. E., Ekman, A. M. L., & Brandefelt, J. (2014). Which significance test performs the best in climate simulations? *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66(1), 23139. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v66.23139>
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077–3107.
- IDEAM. (2010). *Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales regionales*. Recuperado el 10 de octubre 2020 de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Guía+Escenarios+Cambio+Climatico.pdf/72eae24f-04ea-4ce2-9a4b-e551559c48fc>
- Inness, P. y Dorling, S. (2013). *Operational Weather Forecasting*. Primera edición. WILEY-BLACKWELL. Recuperado el 18 de octubre de 2020 de <http://docplayer.net/21055357-Operational-weather-forecasting.html>
- Holton, J. (2004). *An introduction to Dynamic Meteorology*. Cuarta edición. Elsevier

- Academic Press. Recuperado el 17 octubre de 2020 de http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/An%20Introduction%20to%20Dynamic%20Meteorology.pdf
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, 42, 129–151.
- Hong, Song-You, Yign Noh, Jimmy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- IPCC. (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf
- IPCC. (2018). Anexo I: Glosario [Matthews J.B.R. (ed.)]. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)]. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf
- Jacome G. (2012). Sensibilidad del modelo WRF-ARW, a las combinaciones de las parametrizaciones de microfísica y nubes en la región de Cusco. Documento técnico. Servicio Nacional de Meteorología en Hidrología del Perú.
- Janjic, Zavisla I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure

- schemes. Mon. Wea. Rev., 122, 927–945.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H. W., Sauter, T., Themeßl, M., Venema, V. K. C., Chun, K. P., Goodess, C. M., Jones, R. G., Onof, C., Vrac, M. y Thiele-Eich, I. (2010). *Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user*, Rev. Geophys., 48, RG3003, doi:10.1029/2009RG000314.
- NCAR. 2019. ARW Version 4 Modeling System User Guide. National Center for Atmospheric Research.
- MINAM. (2010). Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Recuperado el 19 de octubre de 2020 de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/segunda-comunicacion-nacional-peru-convencion-marco-las-naciones>
- Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J. Geophys. Res., 102, 16663–16682.
- Powers J, Klemp J, Skamarock W, Davis C, Dudhia J, Gill D, Coen J, Gochis D, Ahmadov R, Peckham S, Grell G, Michalakes J, Trahan S, Benjamin S, Alexander C, Dimego G, Wang W, Schwartz C, Romine G, Liu Z, Snyder C, Chen F, Barlage M, Yu W, Duda M. 2016. *The weather research and forecasting model*. American Meteorological Society. DOI:10.1175/BAMS-D-15-00308.1
- Sanchez-Ccoyllo, O., Ordoñez-Aquino, C., Muñoz, A., Llacza, A., Andrade, M. F., Liu, Y., Reategui-Romero, W. y Brasseur, G. 2018. *Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016*. International Journal of Applied Engineering Research. ISSN 0973-4562 Volume 13, Number 11 (2018) pp. 10129-10141
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang W, Powers J, Duda M, Barker D, Huang, X 2019. *A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4* (No. NCAR/TN-556+STR). doi:10.5065/1dfh-6p97
- SENAMHI. 2009. Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de https://www.senamhi.gob.pe/usr/cmn/pdf/comunicacion_nacional.pdf
- SENAMHI. 2012. Escenarios de cambio climático al 2030 y 2050 de las regiones Apurímac y Cusco. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/265>
- SENAMHI. 2016, Vulnerabilidad Climática De Los Recursos Hídricos En Las Cuencas De Los Ríos Chillón, Rímac, Lurín Y Parte Alta Del Mantaro /

Resumen Ejecutivo, Ediciones SENAMHI, Lima, Perú, 250 pp. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/124>

SENAMHI. 2017. Modelamiento hidrológico para el pronóstico estacional de caudales del río Jequetepeque. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-41.pdf>

SENAMHI. 2020. Sectorización climática del territorio peruano. Nota técnica N° 001-2020/SENAMHI/DMA/SPC

Tewari, M., F. Chen, W. Wang, J. Dudhia, M. A. LeMone, K. Mitchell, M. Ek, G. Gayno, J. Wegiel, and R. H. Cuenca, 2004: Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11–15.

Torres V. (2019). Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático. Revista Digital Universitaria. Vol. 20, Núm. 1, enero-febrero 2019. Recuperado el 10 octubre de 2020 de http://www.revista.unam.mx/wp-content/uploads/v20_n1_a3_Tiempo-clima-y-los-fenomenos-atmosfericos-desde-torbellinos-hasta-cambio-climatico.pdf

Wang Y, Leung L, McGregor J, Lee D, Ding Y, Kimura F. 2004. Regional climate modeling: Progress, Challenges, and Prospects. Journal of the Meteorological Society of Japan. Vol. 82, No 6, pp 1599-1628.